

ORIGINAL ARTICLE

Niño 3.4 해수면온도 편차에 따른 필리핀 Bicol 지역 계절강수 민감도 분석

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

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

Seasonal Rainfall Sensitivity to Niño 3.4 Sea Surface Temperature Anomalies 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 the seasonal and spatial variability of the relationship between the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and rainfall in four provinces of the Bicol Region, Philippines, from 1991 to 2020. Quarterly rainfall from PAGASA synoptic stations in Albay, Camarines Norte, Catanduanes, and Masbate was compared with Niño 3.4 sea surface temperature anomalies using linear regression, El Niño composite analysis, and interprovincial rainfall correlations. The ENSO–rainfall relationship was the strongest in DJF and MAM, markedly weakened in JJA, and partially recovered in SON. During JJA, significant negative relationships were retained in Catanduanes and Camarines Norte, whereas no clear relationships were observed in Albay or Masbate. Composite analysis also showed that rainfall under El Niño conditions was 31.0–47.4% lower than that under non-El Niño conditions in DJF and MAM, whereas the differences were minor and statistically inconclusive in JJA. The correlation in mean interprovincial rainfall decreased from 0.84 in DJF and 0.83 in MAM to 0.30 in JJA, before increasing to 0.62 in SON. These results indicate that ENSO-related rainfall variability in the Bicol Region is not spatially or seasonally uniform. Therefore, ENSO-based seasonal rainfall information should be differentiated by province and quarter rather than applied uniformly across the region.

Key words : ENSO, Niño 3.4, Seasonal rainfall, Spatial variability, Bicol Region, Philippines

1. 서 론

엘니뇨-남방진동(El Niño–Southern Oscillation, ENSO)은 열대 태평양에서 나타나는 대표적인 경년 기후변동 현상으로, 필리핀 강수량의 변동을 유발하는 주

요 기후요인 중 하나이다(Dai et al., 1997). El Niño 시기에는 중·동태평양의 해수면온도가 평년보다 상승하고 Walker 순환의 상승역이 동쪽으로 이동하면서 해양대륙(maritime continent) 상공의 대류활동이 약화된다. 이에 따라 필리핀에서는 특히 건기에 강수량이 감

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.

소하는 경향이 나타나는 것으로 알려져 있다(Roberts et al., 2009; Hilario et al., 2009).

그러나 ENSO와 필리핀 강수량의 관계는 시간적·공간적으로 균일하지 않다. Lyon et al.(2006)은 필리핀에서 ENSO-강수 신호의 방향이 계절에 따라 달라질 수 있음을 제시하였으며, 특히 여름철과 가을철 사이에 강수반응의 부호가 반전되는 계절적 비대칭성을 보고하였다. Lyon and Camargo(2009)는 이러한 계절적 변화가 북서태평양 하층 순환과 수분수송의 변화와 관련될 수 있음을 밝혔다. 이러한 결과는 ENSO의 강수영향을 연평균이나 단일 계절 평균으로 평가할 경우, 계절에 따라 약화되거나 반전되는 중요한 신호가 상쇄될 수 있음을 의미한다.

ENSO-강수 관계의 계절 의존성은 필리핀 이외의 지역에서도 확인되어 왔다. Choo et al.(2007)은 한국의 강수량, 기온 및 댐 유입량과 ENSO의 관계가 계절과 지역에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보고하였다. 또한 서북태평양 열대저기압과 한반도 영향 태풍의 경년변동 역시 ENSO 위상과 연관될 수 있는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2008). 이러한 선행연구는 ENSO의 기후영향을 평가할 때 지역과 계절을 세분화할 필요가 있음을 보여준다.

Bicol Region은 ENSO-강수 관계의 계절적·공간적 비균질성을 검토하기에 적합한 지역이다. 이 지역은 농업생산과 농촌생계가 계절강수의 안정성에 크게 의존하는 동시에, 하나의 행정권역 안에 태평양에 직접 노출된 섬·동부 해안지역과 상대적으로 차폐된 내륙·서부지역이 함께 존재한다. 또한 PAGASA의 수정 코로나스 기후구분체계에 따른 Type II, Type III 및 Type IV 기후가 혼재하여 강수의 계절성이 지역별로 다르게 나타난다. 따라서 동일한 ENSO 상태에서도 주와 계절에 따라 강수반응의 방향과 강도가 달라질 가능성이 크다.

Bicol Region은 필리핀의 주요 농업지역이자 태풍과 열대저기압의 영향을 빈번하게 받는 지역으로, El Niño에 따른 가뭄 취약성이 상대적으로 높은 지역으로도 보고되어 왔다(David et al., 2007). ENSO에 대한 강수 민감도가 주와 분기에 따라 다르다면, 지역 전체에 동일한 ENSO 기반 강수전망을 적용하는 것은 한계가 있을 수 있다. 특히 ENSO 신호가 약한 주·분기에서는 전망의 불확실성이 커질 수 있으며, 반대로 신호가 강한 주·분기에서는 보다 적극적인 가뭄·홍수관리 정보로 활용될 가능성이 있다. 따라서 Bicol Region의 지역맞춤

형 농업기후 정보를 구축하기 위해서는 ENSO-강수 관계의 계절별·주별 차이를 먼저 정량적으로 평가할 필요가 있다.

기존 연구는 주로 필리핀 국가 규모 또는 광역지역을 대상으로 ENSO-강수 관계의 계절적 변화를 분석해 왔다. 그러나 Bicol Region 내부의 개별 주를 대상으로 동일한 기간과 분석기준을 적용하여 ENSO 민감도의 계절적·공간적 차이를 비교한 연구는 제한적이다. 특히 주별 차이가 실제로 반복되는 공간적 구조인지, 또는 일부 관측소와 연도에 의존하는 통계적 변동인지는 충분히 검토되지 않았다.

이에 본 연구는 1991~2020년 Bicol Region의 Albay, Camarines Norte, Catanduanes 및 Masbate를 대상으로, 관측소 강수자료와 Niño 3.4 해수면온도 편차(sea surface temperature anomaly, SSTa)의 관계를 기상학적 분기별로 분석하였다. 구체적인 목적은 첫째, 주·분기별 ENSO-강수 관계의 방향과 강도를 정량화하고, 둘째, El Niño와 non-El Niño 조건 간 강수량 차이를 비교하며, 셋째, 계절에 따른 지역 간 강수 변동의 공간적 일관성을 평가하는 것이다. 이를 통해 ENSO-강수 관계가 Bicol Region 전역에서 동일하게 나타나는지, 또는 주와 계절에 따라 차별화되는지를 검토하고, 지역맞춤형 계절강수 정보 활용을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 연구지역

Bicol Region은 필리핀 Luzon섬 남동부에 위치한 Region V로, Albay, Camarines Norte, Camarines Sur, Catanduanes, Masbate 및 Sorsogon의 6개 주로 구성된다. 이 지역은 반도와 도서지역을 함께 포함하며, 태평양과 필리핀해, Sibuyan Sea 및 Ragay Gulf에 인접해 있다. 본 연구에서는 6개 주 가운데 장기간의 강수 관측자료가 확보된 Albay, Camarines Norte, Catanduanes 및 Masbate의 4개 주를 분석대상으로 선정하였다(Fig. 1).

4개 연구지역은 지리적 위치와 해양 노출 특성에서 차이를 보인다. Catanduanes는 Bicol 반도 동쪽의 섬 지역으로 태평양에 직접 노출되어 있으며, Camarines Norte는 Bicol 반도 북동부에 위치하여 태평양 및 Lamon Bay의 영향을 받는다. Albay는 Bicol 반도 남

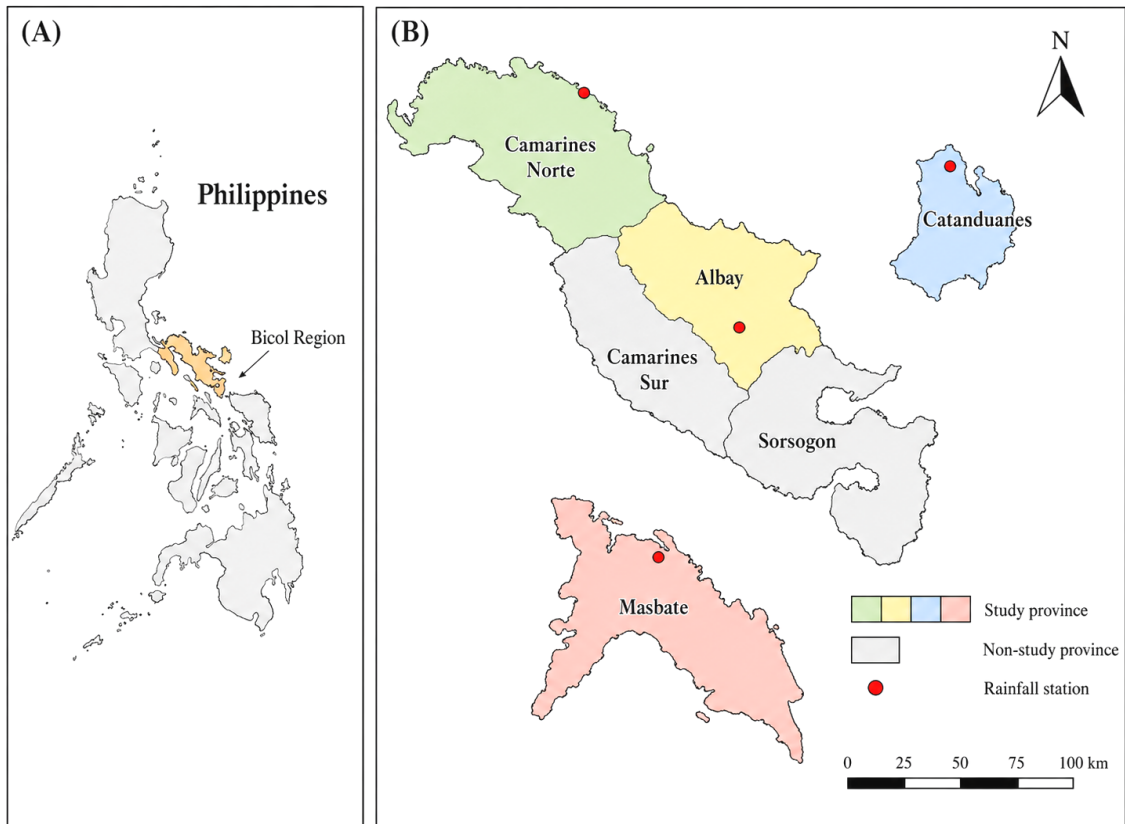


Fig. 1. Locations of the four study provinces and PAGASA synoptic stations in the Bicol Region, Philippines. Red circles indicate the Legazpi, Daet, Virac, and Masbate stations representing Albay, Camarines Norte, Catanduanes, and Masbate, respectively.

동부에 위치하며 태평양과 내륙 지형의 영향을 함께 받을 수 있다. Masbate는 Bicol Region 남서부의 도서 지역으로, Sibuyan Sea와 Visayan Sea에 둘러싸여 있다. 이러한 지리적 차이는 계절풍, 수분수송 및 열대저기압과 관련된 강수반응이 주별로 다르게 나타날 가능성을 제공한다.

기후학적으로 Bicol Region에는 PAGASA의 수정 코로나스 기후구분체계에 따른 Type II, Type III 및 Type IV 기후가 혼재한다. Camarines Norte와 Catanduanes는 뚜렷한 건기가 없고 일반적으로 11월부터 이듬해 1월 사이에 강수가 집중되는 Type II 기후의 특성이 우세하다. Masbate는 비교적 짧은 건기가 나타나는 Type III 기후에 해당하며, Albay에는 Type II와 연중 강수분포가 비교적 균등한 Type IV 기후가 함께 나타난다. 이러한 강수 계절성과 해양 노출의 공간

적 차이는 ENSO에 대한 계절별 강수 민감도를 지역 단위로 비교하기 위한 기후학적 배경을 제공한다.

2.2. 연구자료

본 연구에서는 Bicol Region의 4개 주를 대표하는 종관기상관측소의 1991~2020년 월강수량 자료를 사용하였다. 분석에 이용한 관측소는 Albay주의 Legazpi station, Camarines Norte주의 Daet station, Catanduanes주의 Virac station 및 Masbate주의 Masbate station이다. 강수자료는 필리핀 대기지구물리천문청(Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration, PAGASA)으로부터 제공받았다.

ENSO 조건은 미국 해양대기청(National Oceanic

and Atmospheric Administration, NOAA)의 Oceanic Niño Index (ONI)를 이용하여 나타냈다. ONI는 Niño 3.4 해역(5°N-5°S, 170°W-120°W)의 해수면온도 편차를 중첩된 3개월 이동평균으로 산정한 지수이다. 본 연구에서는 DJF, MAM, JJA 및 SON에 해당하는 ONI 값을 각 기상학적 분기의 ENSO 상태를 나타내는 연속변수로 사용하였다.

El Niño 합성분석에는 NOAA Climate Prediction Center의 Oceanic Niño Index (ONI) 공식 분류기준(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)에 따른 엘니뇨 연도 분류를 참고하였다. 연구기간 중 확인된 El Niño 사건의 시작연도인 1991, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009, 2014, 2015 및 2018년을 El Niño 분석연도(n=10)로 분류하였으며, 나머지 20개 연도는 non-El Niño 분석연도(n=20)로 구분하였다. 각 El Niño 분석연도의 DJF, MAM, JJA 및 SON 자료를 동일한 El Niño 조건으로 적용하였다.

월강수량과 ONI는 DJF (12~2월), MAM (3~5월), JJA (6~8월) 및 SON (9~11월)의 4개 기상학적 분기로 정리하였다. DJF는 전년도 12월과 해당 연도 1~2월로 구성하였으며, 예를 들어 DJF 1992는 1991년 12월부터 1992년 2월까지의 자료로 정의하였다. 각 분기의 강수량은 해당 3개월 월강수량의 산술평균으로 산정하였으며, 같은 분기의 ONI 값과 결합하였다. 그 결과 각 주-분기 조합별로 30개년의 관측값을 확보하였고, 4개 주와 4개 분기를 결합한 총 16개의 주-분기 분석단위를 구성하였다.

2.3. 연구방법

주-분기별 강수량과 ENSO 간의 관계는 단순선형회귀모형을 이용하여 평가하였다.

$$R_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_i + \varepsilon_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서 R_i 는 i 번째 연도의 분기 강수량(mm), S_i 는 동일 연도-분기의 Niño 3.4 SSTA(°C), β_0 는 절편, β_1 은 Niño 3.4 SSTA에 대한 강수량의 회귀기울기, ε_i 는 잔차항이다. 회귀기울기가 음수이면 Niño 3.4 SSTA가 증가할수록 강수량이 감소하는 관계를, 양수이면 강수량이 증가하는 관계를 의미한다. 회귀모형의 설명력은

결정계수(R^2)로 평가하였으며, 회귀기울기의 통계적 유의성은 양측 t-검정을 이용하여 검정하였다. 기본 유의수준은 0.05로 설정하였고, $0.05 \leq p < 0.10$ 인 결과는 경계적 유의성이 있는 탐색적 결과로 구분하였다.

회귀분석에서 나타난 관계를 실제 강수량 차이로 보완하기 위해 각 주-분기별로 El Niño 분석연도(n=10)와 non-El Niño 분석연도(n=20)의 평균 강수량을 비교하였다. 두 집단의 표본수와 분산이 서로 다를 가능성을 고려하여 등분산을 가정하지 않는 Welch's two-sample t-test를 적용하였다. 강수량 차이는 non-El Niño 평균에 대한 El Niño 평균의 백분율 편차로 나타냈다.

계절별 강수변동의 공간적 일관성을 평가하기 위해 동일 분기의 4개 관측소 강수량 간 Pearson 상관계수를 산정하였다. 각 분기별로 가능한 6개 관측소 쌍의 상관계수를 계산하고, 이들의 평균과 최솟값-최댓값 범위를 이용하여 계절별 공간적 결합 정도를 비교하였다. 높은 평균 상관계수는 4개 지역의 강수량이 비교적 일관되게 변동했음을 의미하며, 낮은 값은 지역별 강수변동의 차이가 커졌음을 나타낸다.

모든 자료처리와 통계분석은 Python 환경에서 pandas, SciPy 및 statsmodels 라이브러리를 이용하여 수행하였다.

3. 결과

본 연구에서는 Bicol Region 4개 주의 분기 강수량과 Niño 3.4 SSTA 간 관계를 주-분기 단위로 분석하였다. 먼저 ENSO-강수 관계의 계절별 변화를 살펴보고(3.1절), JJA에 나타나는 지역별 차이를 비교하였다(3.2절). 이어 El Niño와 non-El Niño 조건 간 평균 강수량 차이를 평가하고(3.3절), 지역 간 강수변동의 공간적 일관성이 계절에 따라 어떻게 달라지는지를 분석하였다(3.4절).

3.1. ENSO-강수 결합강도의 계절적 변동 :

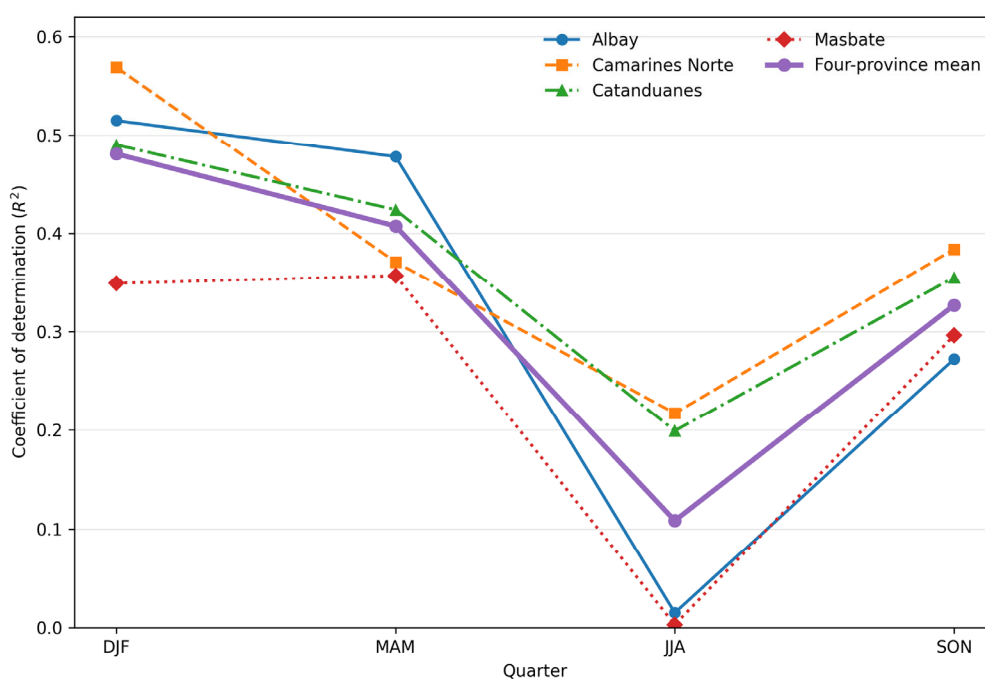
JJA 저점과 SON 회복

Niño 3.4 SSTA와 분기 강수량 간 관계의 계절적 변화를 평가하기 위해 4개 주와 4개 분기의 총 16개 조합에 대해 단순선형회귀분석을 수행하였다(Table 1). 각 분기의 4개 주 평균 결정계수는 DJF 0.48, MAM 0.41, JJA 0.11 및 SON 0.33으로 나타났다. 즉, ENSO-강수

Table 1. Results of linear regression between quarterly rainfall and Niño 3.4 SSTA by province and quarter during 1991–2020

Province	Quarter	n	Slope (mm/°C)	Intercept (mm)	R ²	p-value
Albay	DJF	30	-117.93	406.6	0.515*	8.08e-6
	MAM	30	-126.23	198.0	0.478*	2.33e-5
	JJA	30	14.85	240.1	0.015	0.515
	SON	30	-47.72	351.1	0.272*	0.003
Camarines Norte	DJF	30	-132.98	393.5	0.569*	1.45e-6
	MAM	30	-122.28	158.4	0.371*	3.50e-4
	JJA	30	-43.79	206.1	0.217*	0.011
	SON	30	-76.23	426.2	0.384*	2.61e-4
Catanduanes	DJF	30	-102.07	314.3	0.490*	1.68e-5
	MAM	30	-118.21	164.9	0.424*	9.78e-5
	JJA	30	-45.72	219.9	0.199*	0.014
	SON	30	-71.36	360.1	0.355*	5.08e-4
Masbate	DJF	30	-51.42	196.6	0.349*	5.86e-4
	MAM	30	-76.90	98.5	0.357*	4.92e-4
	JJA	30	3.52	175.1	0.003	0.789
	SON	30	-32.54	205.3	0.296*	0.002

Note: Asterisks indicate statistically significant relationships at $p < 0.05$. Negative slopes indicate decreasing rainfall with increasing Niño 3.4 SSTA.

**Fig. 2.** Seasonal variation in the coefficient of determination (R²) between Niño 3.4 SSTA and quarterly rainfall in the four study provinces. Individual lines represent each province, and the bold line indicates the four-province mean.

관계는 DJF와 MAM에 상대적으로 강하게 나타났고 JJA에 크게 약화된 후 SON에 다시 강화되는 비단조적 계절 변화를 보였다(Fig. 2).

DJF에는 주별 R^2 가 0.35~0.57, MAM에는 0.36~0.48의 범위로 나타났으며, 모든 주에서 음의 회귀기울기와 통계적으로 유의한 관계가 확인되었다(Table 1). 이는 Niño 3.4 SSTA가 높을수록 Bicol Region의 강수량이 감소하는 관계가 DJF와 MAM에 비교적 일관되게 나타났음을 의미한다.

반면 JJA에는 지역 간 차이가 크게 증가하였다. Albay와 Masbate에서는 결정계수가 각각 0.015와 0.003으로 낮았고 통계적으로 유의하지 않았다. Camarines Norte와 Catanduanes에서는 각각 $R^2=0.217$ 과 0.199로 상대적으로 높은 관계가 유지되었다. SON에는 모든 주에서 다시 음의 관계가 나타났으며, 결정계수도 0.27~0.38로 증가하여 JJA보다 뚜렷한 회복 양상을 보였다.

이러한 결과는 ENSO와 Bicol Region 강수량의 관계가 연중 일정하지 않으며, JJA의 약화와 SON의 재강화가 주별로 서로 다른 정도로 나타남을 보여준다. 따라서 연평균이나 특정 단일 계절의 결과만으로 ENSO-강수 관계를 설명할 경우 이러한 계절적·지역적 차이가 충분히 반영되지 않을 수 있다.

3.2. JJA 분기의 지역적 분화

JJA에는 ENSO-강수 관계가 전반적으로 약화되었으나, 그 정도는 지역별로 다르게 나타났다. Catanduanes와 Camarines Norte의 결정계수는 각각 0.199와 0.217로 나타났으며, 회귀기울기도 모두 음의 값을 보였다(Table 1; Fig. 3). 두 지역의 관계는 원시 p -value 기준으로 각각 $p=0.014$ 와 $p=0.011$ 이었다. 반면 Albay와 Masbate의 결정계수는 각각 0.015와 0.003으로 매우 낮았으며, 통계적으로 유의한 관계가 나타나지 않았다.

개별 연도 자료에서도 이러한 지역적 차이가 확인되었다(Fig. 4). Catanduanes와 Camarines Norte에서는 Niño 3.4 SSTA가 증가할수록 JJA 강수량이 감소하는 경향이 비교적 뚜렷하게 나타난 반면, Albay와 Masbate에서는 관측값의 산포가 크고 회귀기울기도 뚜렷하지 않았다. 따라서 JJA의 낮은 4개 주 평균 결정계수는 모든 지역에서 ENSO 신호가 동일하게 소멸한 결과라기보다, 일부 지역에서는 관계가 유지되고 다른

지역에서는 크게 약화된 결과로 해석할 수 있다.

이러한 차이는 각 관측소의 지리적 위치 및 해양 노출 특성과 관련될 가능성이 있다. Catanduanes의 Virac 관측소는 태평양에 직접 노출된 섬 지역에 위치하고, Camarines Norte의 Daet 관측소도 Bicol 반도 북동부에 위치한다. 반면 Legazpi와 Masbate 관측소는 서로 다른 해안·지형 조건의 영향을 받는다. 다만 본 연구에서는 지형, 바람장 및 수분수송을 직접 분석하지 않았으므로, 관측소 위치만으로 JJA의 지역 차이에 대한 물리적 원인을 확정하기는 어렵다. 본 결과는 ENSO-강수 관계의 계절적 약화가 Bicol Region 전역에서 균일하게 나타나지 않으며, 지역별 특성을 고려할 필요가 있음을 보여준다.

3.3. 엘니뇨 합성 강수편차

회귀분석에서 나타난 ENSO-강수 관계를 실제 강수량 차이로 확인하기 위해, 각 주·분기별로 El Niño와 non-El Niño 조건의 평균 강수량을 비교하였다(Table 2; Fig. 5). DJF와 MAM에는 4개 주 모두에서 El Niño 조건의 평균 강수량이 non-El Niño 조건보다 낮았다. DJF의 감소율은 31.0~39.5%, MAM은 37.8~47.4%로 나타나, 연초와 전반기에 비교적 큰 강수 감소가 확인되었다.

원시 p -value를 기준으로 DJF에는 4개 주 모두에서 두 집단 간 차이가 유의하였으며, MAM에는 Albay, Camarines Norte 및 Catanduanes에서 유의한 차이가 나타났다. Masbate의 MAM 결과는 46.9%의 큰 감소를 보였으나 $p=0.054$ 로 0.05 유의수준에는 미치지 못하였다.

반면 JJA에는 El Niño 조건과 non-El Niño 조건 간 차이가 전반적으로 작았다. Albay, Catanduanes 및 Masbate에서는 El Niño 조건의 강수량이 각각 10.7%, 8.9% 및 4.6% 낮았으나, Camarines Norte에서는 1.3% 높은 값을 보였다. 모든 주에서 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다.

SON에는 4개 주 모두에서 El Niño 조건의 평균 강수량이 10.4~16.5% 낮았으나, 원시 p -value 기준으로 유의한 차이는 Albay에서만 확인되었다. 이는 회귀분석에서 SON의 ENSO-강수 관계가 4개 주 모두에서 유의하게 나타난 결과와 다소 차이를 보인다. 이러한 차이는 회귀분석이 Niño 3.4 SSTA의 연속적인 변화를 이용하는 반면, 합성분석은 연도를 El Niño와 non-El

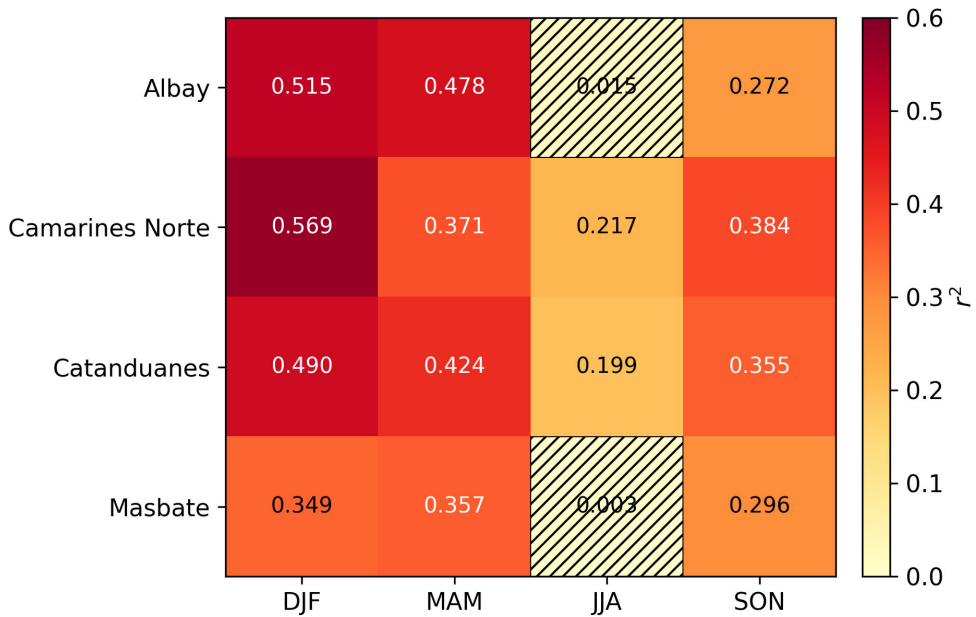


Fig. 3. Coefficient of determination (R^2) between Niño 3.4 SSTA and quarterly rainfall by province and quarter. Hatched cells indicate relationships with $p \geq 0.05$.

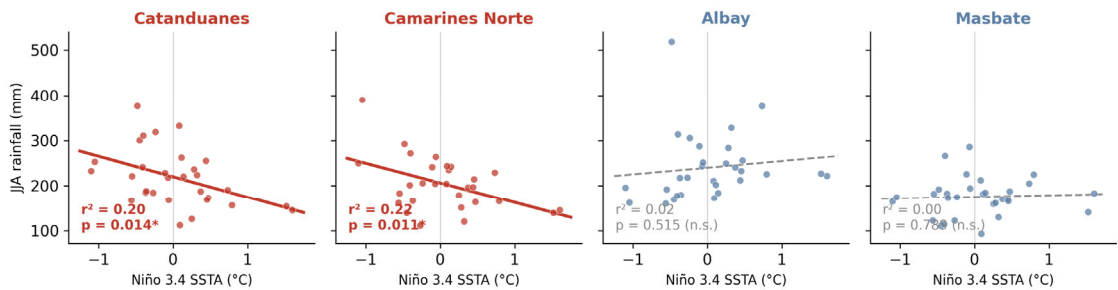


Fig. 4. Relationship between Niño 3.4 SSTA and JJA rainfall in the four study provinces. Solid lines indicate relationships with $p < 0.05$, whereas dashed lines indicate relationships with $p \geq 0.05$.

Niño의 두 집단으로 구분하기 때문에 ENSO 강도의 세부 차이가 단순화되기 때문으로 해석할 수 있다.

종합하면, El Niño 조건의 강수 감소는 DJF와 MAM에 가장 크게 일관되게 나타났으며, JJA에는 크게 약화되었다. SON에는 강수 감소 경향이 다시 나타났지만, 그 크기와 통계적 명확성은 DJF와 MAM보다 낮았다.

3.4. 계절별 공간적 일관성

ENSO-강수 관계의 계절적 변화가 지역 간 강수변동의 일관성과 관련되는지를 살펴보기 위해, 각 분기별로 4개 주 강수량 간 Pearson 상관계수를 산정하였다 (Fig. 6). DJF와 MAM에는 6개 주 조합의 평균 상관계수가 각각 0.84와 0.83으로 높게 나타났으며, 개별 상관계수도 각각 0.77~0.92와 0.73~0.90의 범위에 분포하였다. 이는 두 분기에 4개 주의 강수량이 비교적 일관된 방향으로 변동했음을 보여준다.

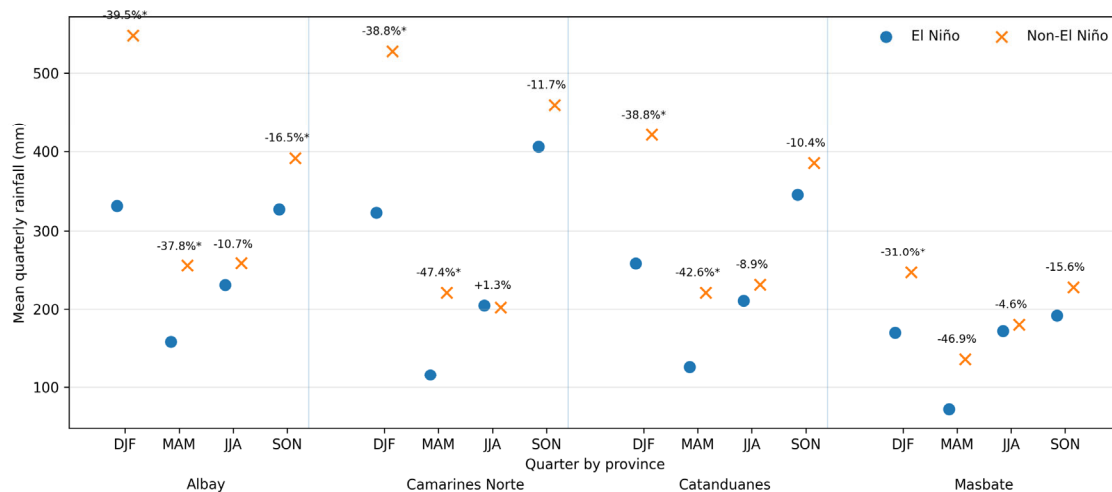


Fig. 5. Composite mean quarterly rainfall under El Niño and non-El Niño conditions by province during 1991–2020. Percentage labels indicate the deviation of the El Niño mean from the corresponding non-El Niño mean. Asterisks indicate differences with raw $p < 0.05$ based on Welch's t-test.

Table 2. Composite mean quarterly rainfall under El Niño and non-El Niño conditions, with Welch's t-test results, by province and quarter during 1991–2020

Province	Quarter	El Niño mean (mm)	Non-El Niño mean (mm)	Difference (%)	t	p
Albay	DJF	331.3	547.6	-39.5	-3.52	0.002
	MAM	158.6	255.2	-37.8	-2.46	0.025
	JJA	230.6	258.1	-10.7	-0.84	0.413
	SON	327.0	391.6	-16.5	-2.13	0.043
Camarines Norte	DJF	323.0	527.7	-38.8	-2.77	0.013
	MAM	116.2	220.7	-47.4	-2.48	0.023
	JJA	204.9	202.2	+1.3	0.12	0.906
	SON	406.1	459.6	-11.7	-1.30	0.204
Catanduanes	DJF	257.9	421.1	-38.8	-2.74	0.013
	MAM	126.7	220.7	-42.6	-2.44	0.025
	JJA	210.6	231.1	-8.9	-0.84	0.411
	SON	345.4	385.3	-10.4	-1.03	0.310
Masbate	DJF	170.3	246.8	-31.0	-2.19	0.039
	MAM	72.5	136.5	-46.9	-2.11	0.054
	JJA	172.2	180.5	-4.6	-0.45	0.656
	SON	192.1	227.6	-15.6	-1.45	0.167

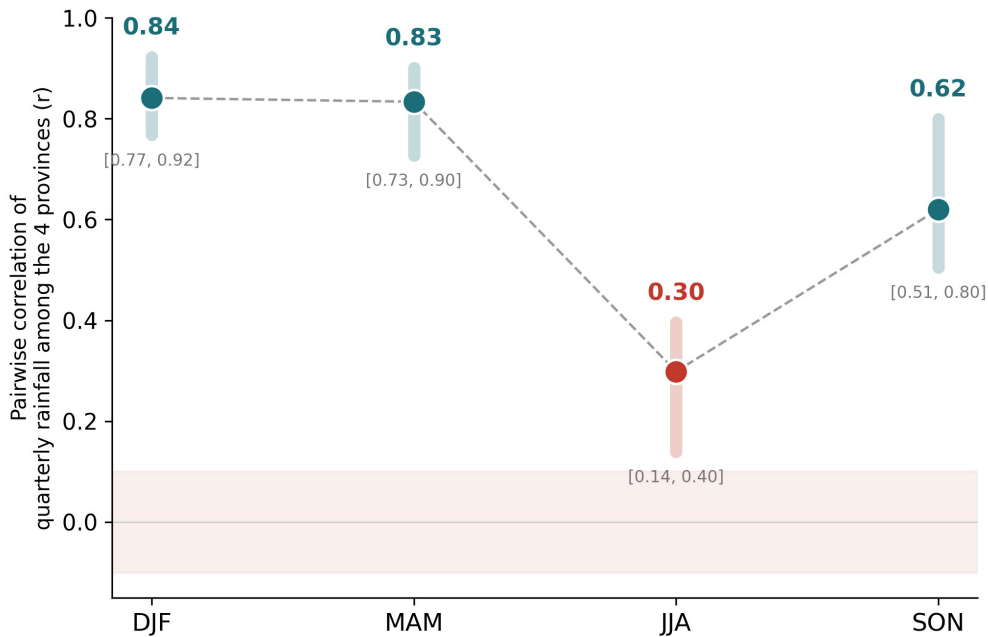


Fig. 6. Seasonal variation in pairwise correlations of quarterly rainfall among the four study provinces during 1991–2020. Points indicate the mean of the six pairwise correlations, and vertical bars represent the corresponding minimum–maximum range.

반면 JJA에는 평균 상관계수가 0.30으로 크게 낮아졌고, 개별 상관계수의 범위도 0.14~0.40으로 축소되었다. 이는 JJA에 지역 간 강수변동의 동조성이 약화되고, 주별 강수 특성의 차이가 상대적으로 커졌음을 의미한다. 이러한 결과는 3.1절에서 확인된 JJA의 낮은 ENSO-강수 설명력과 정합적이며, 3.2절에서 나타난 지역별 반응 차이와도 연결된다.

SON에는 평균 상관계수가 0.62로 다시 증가하였으나, DJF와 MAM 수준에는 미치지 못하였다. 이는 JJA에 약화되었던 지역 간 강수변동의 일관성이 SON에 부분적으로 회복되었음을 보여준다. 이러한 변화는 ENSO-강수 관계가 JJA에 약화된 후 SON에 다시 강화된 결과와 유사한 계절적 패턴을 나타낸다.

다만 본 연구의 상관분석은 지역 간 강수변동의 통계적 일관성을 평가한 것으로, 계절풍, 수분수송 및 대류 활동과 같은 물리적 메커니즘을 직접 검증한 것은 아니다. 따라서 JJA의 낮은 공간적 일관성은 국지적 강수와 정의 상대적 영향이 커졌을 가능성을 시사하지만, 이를 확정적으로 설명하기 위해서는 추가적인 대기순환 및 수분수송 분석이 필요하다.

4. 고찰

본 연구에서는 Bicol Region의 ENSO-강수 관계가 계절과 지역에 따라 다르게 나타남을 확인하였다. Niño 3.4 SSTA와 강수량의 관계는 DJF와 MAM에 강하게 나타났으며, JJA에 크게 약화된 후 SON에는 결정계수가 0.27~0.38 수준으로 다시 강화되는 비단조적인 계절 변화를 보였다. 이는 ENSO의 강수영향이 연중 일정하게 약화되는 것이 아니라 특정 분기(JJA)에 국한된 저점을 형성하며, 연평균이나 단일 계절 평균만으로는 이러한 계절적 구조를 충분히 설명하기 어렵다는 점을 보여준다.

특히 JJA에는 Catanduanes와 Camarines Norte에서만 상대적으로 뚜렷한 음의 관계가 유지되었다. 반면 Albay와 Masbate에서는 ENSO-강수 관계가 거의 나타나지 않았다. 이러한 차이는 관측소의 지리적 위치와 해양 노출 특성의 영향을 받을 가능성이 있으나, 본 연구에서는 대기순환과 수분수송을 직접 분석하지 않았으므로 물리적 원인을 단정하기는 어렵다.

El Niño와 non-El Niño 조건의 합성분석에서도 DJF와 MAM에 가장 큰 강수 감소가 나타났고, JJA에는 차이가 크게 약화되었다. SON에는 4개 주 모두에서 10.4~16.5%의 감소 경향이 나타났으나, 통계적 유의성은 Albay에서만 확인되어 회귀분석에서 SON의 관계가 4개 주 모두 유의했던 결과와는 다소 차이를 보였다. 이는 연속적인 SSTA를 이용한 회귀분석이 ENSO 강도의 세부적인 차이를 민감하게 반영하는 반면, 합성분석은 연도를 두 집단으로 단순화하여 비교하기 때문에 상대적으로 약한 신호를 포착하는 데 한계가 있기 때문으로 해석할 수 있다.

지역 간 강수 상관 역시 이와 유사한 계절 변화를 보였다. DJF와 MAM에는 상관계수가 0.83~0.84로 높게 유지되다가 JJA에 0.30까지 급격히 낮아졌으며, SON에는 0.62로 다시 높아져 DJF·MAM 수준에는 미치지 못하지만 JJA보다는 뚜렷하게 회복된 양상을 보였다. ENSO 신호의 강도와 지역 간 공간적 일관성이 유사한 시기에 함께 약화되고 함께 회복된다는 사실은, JJA의 저점이 우연이 아니라 이 시기 강수체계 자체의 특성 변화와 관련되어 있을 가능성을 시사한다. 다만 본 결과는 통계적 관계에 기반하므로, 계절풍과 국지대류의 역할을 확인하기 위해서는 바람장, 수분수송 및 대류활동을 포함한 추가 분석이 필요하다.

아울러 본 연구는 각 주를 대표하는 단일 종관기상관측소의 자료에 기반하고 있어, 관측소 인근의 강수 특성을 해당 주 전체로 일반화하는 데에는 한계가 있을 수 있다. 다만 DJF·MAM 분기에는 4개 관측소 간 상관계수가 0.83~0.84에 달할 정도로 높은 공간적 일관성을 보여 이 시기에는 단일 관측소 자료가 해당 주의 광역 강수 신호를 상당히 잘 대표하는 것으로 판단된다. 반면 JJA와 같이 공간적 일관성이 크게 낮아지는 시기에는 관측소 자료가 주 내부의 강수 변동성을 충분히 포착하지 못할 가능성이 있으며, SON에는 이러한 대표성이 부분적으로 회복되는 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 주별 다중 관측소 자료를 활용하여 이러한 공간적 대표성을 보완할 필요가 있다.

종합하면 ENSO 기반 강수정보는 Bicol Region 전체에 동일하게 적용하기보다 주와 계절을 구분하여 활용하는 것이 적절하다.

5. 결론

본 연구는 1991~2020년 필리핀 Bicol Region의 Albay, Camarines Norte, Catanduanes 및 Masbate를 대상으로 Niño 3.4 SSTA와 분기 강수량 간의 관계를 분석하였다. ENSO-강수 관계는 DJF와 MAM에 가장 강하게 나타났고, JJA에 크게 약화된 뒤 SON에 다시 증가하는 계절적 변화를 보였다.

JJA에는 Catanduanes와 Camarines Norte에서 상대적으로 뚜렷한 음의 관계가 유지된 반면, Albay와 Masbate에서는 관계가 거의 나타나지 않았다. El Niño와 non-El Niño 조건의 평균 강수량 비교에서도 DJF와 MAM에 가장 큰 강수 감소가 확인되었으며, JJA에는 차이가 크게 약화되었다. 지역 간 강수 상관도 DJF와 MAM에 높고 JJA에 가장 낮아, ENSO 신호의 계절적 약화가 공간적 일관성 감소와 함께 나타남을 보여 주었다.

이러한 결과는 Bicol Region의 ENSO-강수 관계가 지역과 계절에 따라 다르게 나타난다는 점을 시사한다. 따라서 ENSO 기반 계절강수 전망과 농업기후 정보는 지역 전체에 동일하게 적용하기보다 주와 분기를 구분하여 활용하는 것이 적절하다. 다만 본 연구는 4개 관측소의 통계적 관계를 중심으로 분석하였으므로, 향후에는 대기순환, 수분수송, 지형 및 국지대류 특성을 함께 고려한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

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

REFERENCES

- Choi, K. S., Kim, B. J., Byun, H. R., 2008, Relationship between Korean Peninsula landfalling tropical cyclones and interannual climate variabilities, J. Korean Earth Sci. Soc., 29(5), 375-385.
- Choo, H. J., Kim, T. W., Lee, J. K., Lee, J. H., 2007, Seasonal relationship analysis between ENSO and hydrological variables in Korea, J. Korea Water Resour. Assoc., 40(4), 299-311.
- Dai, A., Fung, I. Y., Del Genio, A. D., 1997, Surface observed global land precipitation variations during 1900-1988, J. Climate, 10(11), 2943-2962.
- David, W., De Los Reyes, M. L., Fajardo, A., 2007, Relative vulnerability of the different provinces of

- the Philippines to El Niño-induced droughts of various magnitudes, *Philipp. Agric. Sci.*, 90(3), 315–330.
- Hilario, F. D., de Guzman, R., Ortega, D., Hayman, P. T., Alexander, B., 2009, El Niño Southern Oscillation in the Philippines: Impacts, forecasts, and risk management, *Philipp. J. Dev.*, 36(1), 9–34.
- 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.
-
- Professor. Hana Na
Department of Atmospheric Environment and Information Engineering, Inje University
hana1@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