

현재 기후 모의실험에서 나타나는 지중해의 기후에 대한 전 지구, 원격, 지역 영향들

김고운¹⁾ · 서경환^{1),2)*}

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학과, ²⁾부산대학교 기후과학연구소

(접수일: 2020년 5월 17일, 수정일: 2020년 7월 2일, 게재확정일: 2020년 7월 9일)

Global, Remote, and Local Effects on the Mediterranean Climate in Present-Day Simulations

Go-Un Kim¹⁾ and Kyong-Hwan Seo^{1),2)*}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System,
Pusan National University, Busan, Korea

²⁾Research Center for Climate Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 17 May 2020; revised 2 July 2020; accepted 9 July 2020)

Abstract Impacts on the atmospheric circulation and ocean system over the Mediterranean during boreal summer are investigated using Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) historical simulations (from 1911 to 2005). As the climate warms, global and remote effects lead to a strengthening in descending motion, an increase in sea surface temperature (SST) and surface dryness, but a decrease in marine primary production over the Western Mediterranean. The global effect is estimated from interannual variability over the global mean SST and the remote effect is driven by diabatic forcing generated from the South and East Asian summer monsoons. On the other hand, a local contribution leads to the strengthened descending motion and increased surface dryness over the Eastern Mediterranean, whereas the marine primary production over this region tends to increase due to possibly the urban wastewater and sewage. Our result suggests that particular attention needs to be paid to conserve the marine ecosystem over the Mediterranean.

Key words: Mediterranean climate, Asian monsoon, climate change, atmospheric circulation, remote effect

1. 서 론

지중해는 기후 변화에 취약한 핫 스팟(hotspot) 지역 중 하나이다(Giorgi, 2006). 유로-지중해 지역은 2003년 여름철에 전례 없는 이상 고온 현상을 겪었고(Schar et al., 2004), 이후에도 극한 고온 현상의 발생

빈도가 증가하며 발생 강도도 강해지는 추세이다(Christensen et al., 2013; Frölicher and Laufkötter, 2018). 이러한 기후 변화는 유로-지중해 지역의 수자원 부족, 인류 보건 위협, 육상과 해양 생태계 파괴, 농업과 어업 생산량 감소 등 사회 및 경제적 분야에 막대한 영향을 주고 있다(Myers et al., 2000; Giorgi, 2006; Christensen et al., 2013).

여름철 지중해 기후는 하강 기류를 동반하며 고온 건조하다. 이러한 특징적인 기후는 다양한 대기 및 해양 현상들과 연관된다(Rodwell and Hoskins, 1996; Raicich et al., 2003; Alpert et al., 2006; Folland et

*Corresponding Author: Kyong-Hwan Seo, Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-2181, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: khseo@pusan.ac.kr

al., 2009; Mariotti and Dell'Aquila, 2012; Tyrlis et al., 2013; Cherchi et al., 2014). 예를 들어, 남아시아 여름 몬순(South Asian summer monsoon, SASM)은 몬순-사막 원격 상관을 통해 지중해에 하강 기류와 덥고 건조한 상태를 만들며(Rodwell and Hoskins 1996), 여름철 지중해 기후에 가장 큰 영향을 미친다고 한다. 한편, 지중해는 양의 북대서양 여름 진동(summer North Atlantic Oscillation)일 때 상대적으로 춥고 습해지며, 음의 북대서양 여름 진동일 때 상대적으로 따뜻하고 건조해진다(Folland et al., 2009; Mariotti and Dell'Aquila, 2012). 북대서양 수십 년 진동(Atlantic Multidecadal Oscillation)은 지중해 해수면 온도(sea surface temperature, SST)와 양의 상관관계를 가진다(Mariotti and Dell'Aquila, 2012). 그 외에도 서아프리카 몬순(Western African monsoon), 사헬 강수, 지역 순환, 지형적 요소 등이 지중해 기후와 관련 있다(Raicich et al., 2003; Alpert et al., 2006; Tyrlis et al., 2013). 위의 여러 현상들이 전 지구적, 원격적, 지역적으로 지중해 기후에 미치는 영향은 각각 다르다. 그러므로 지중해 지역의 기후에 미치는 영향들에 대한 전체적인 이해가 중요하다. 또한 이를 바탕으로 유로-지중해 지역의 여름철 기후 예측 성능을 향상시킴으로써 기후 변화로 인해 인간과 자연이 입는 피해를 줄이는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

기후 변화에 따른 지중해의 대기 순환과 해양 시스템 변화에 관한 연구들이 활발히 진행 중이다. 재분석과 관측 자료를 이용한 선행 연구에 따르면 1980년대부터 서쪽 지중해(Western Mediterranean, WM)의 해수면 온도가 증가하고 있다(Nykjaer, 2009; Volosciuk et al., 2016; Kim et al., 2019). 그 지역의 하강 기류도 강해지는 경향을 보이며 두 변수의 상관계수는 0.44로 신뢰 수준 99%에서 유의하다(Kim et al., 2019). 또한, 서쪽 지중해의 엽록소(Chlorophyll-a) 농도가 감소하는 추세이며, 유럽 정어리(European pilchard) 어획량도 감소되고 있다(Tzanatos et al., 2014; EUMOFA, 2017). 이러한 결과들은 서쪽 지중해 지역의 해양 시스템이 파괴되고 있음을 보여준다. 하지만 선행 연구에서 사용된 위성 관측 자료인 엽록소 농도의 기간이 충분하지 않고, 어로와 어선의 기술 발전에 따른 영향이 어획량 자료에 내포되어 있을 수 있다. Anav et al. (2013)은 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차 보고서에 참여한 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)의 지구 시스템 모형(Earth System Model)들이 해양 탄소 순환에 대해 전반적으로 우수한 모의 성능을 보인다고 제시하였다. 따라서 지구 시스템 모형 자료를 이용한 분석 결과는 지중해 지역의 기후 변화에 대한 이해도를 높일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 지구 시스템 모형 자료를 사용하여 현재 기후 모의 실험에서 나타나는 지중해의 기후에 대한 전 지구(global), 원격(remote), 지역(local) 영향을 분석하였다. 2장에서는 자료 및 분석 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 기후학적인 여름철 지중해 특징과 지중해 지역의 대기, 수문과 해양 변화에 미치는 각 영향을 기술하고, 4장에서는 결과를 요약한다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구는 CMIP5 모형 중 4개 지구 시스템 모형의 월별 자료를 사용하였다(Taylor et al., 2012). 사용된 모형은 CESM1-BGC, GFDL-ESM2M, GFDL-ESM3G, IPSL-CM5A-MR이다. 각각 모형들의 자료는 http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/Reference-Archive.html에서 얻을 수 있으며, 수평 격자 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 로 선형 보간하였다. 분석에 사용된 변수는 연직 바람(700-hPa omega), 강수량(precipitation), 증발량(evaporation), 해수면 온도, 해양 일차 생산량(vertically integrated total primary production by phytoplankton, INTPP), 용존 산소량(dissolved oxygen concentration at the surface)이다. 해양 일차 생산량은 해양 먹이망의 기초인 식물성 플랑크톤이 생산하는 에너지로서 해양 생태계의 상태를 나타낼 수 있는 척도이다. 해양 일차 생산량이 양의 값을 가지면 해양에 영양분이 풍부하고 해양 생물들이 살기 좋은 호조된 상태를 의미한다. 모든 분석은 1911년부터 2005년까지 과거 및 현재 기후 모의실험(historical)의 95년 여름철(6~8월, JJA)에 대해 4개 지구 시스템 모형의 앙상블 평균(multi-model ensemble, MME)을 사용하여 수행되었다. 현재 기후 모의실험은 관측과 동일하게 태양 강제력, 인공 및 화산 영향으로 인한 대기 구성, 자연과 인공 에어로졸 등 자연 변동성과 인간 활동에 의한 변동성을 포함하고 있다.

한 지역에서 미치는 여러 영향을 정성적으로 평가하기 위해, 한 지역의 총 영향(total effect)은 전 지구, 원격, 지역적 영향으로 구성되어 있다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \text{total effect} &= \text{global effect} + \text{remote effect} \\ &+ \text{local effect} + \text{residual} \end{aligned}$$

위 식의 총 영향은 서쪽 지중해($0^\circ \sim 20^\circ\text{E}$, $35^\circ \sim 45^\circ\text{N}$)의 평균 해수면 온도 아노말리 시계열에 대한 회귀 분석으로 추정된다. 이 지역은 지중해에서 가장 변동성이 큰 지역이다(Fig. 1). 그리고 이 시계열을 사용한 회귀 분석 결과는 지중해 전체 영역의 시계열을 사용한 회귀 분석 결과와 비슷하였다. 오른쪽 첫 번째 항인 전 지구 영향은 대규모(large-scale) 영역의 변화를 나타내는 시계열에 대해 회귀 분석하여 추정된다. 이

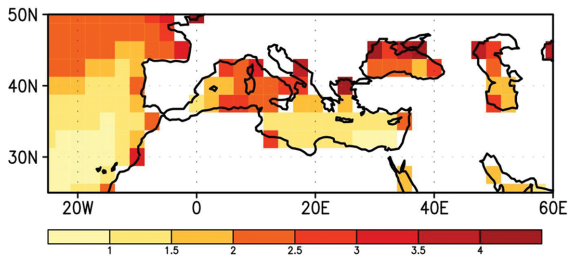


Fig. 1. Climatological variance of SST anomaly for the four-ESM model ensemble-mean during boreal summer (1911~2005).

시계열은 전 지구(0~360°E, 60°S~60°N)의 평균 해수면 온도 아노말리를 이용하여 정의된다. 오른쪽 두 번째 항은 원격 영향으로 남아시아와 동아시아 여름 몬순과 관련된다. 기후 변화에 따라 남아시아와 동아시아 지역의 증가된 강수가 원격 상관을 통해 지중해 기후에 가장 큰 영향을 끼치므로(Seo and Ok, 2013; Seo et al., 2013; Kim et al., 2019) 두 지역의 강수를 대표적인 원격 요소로 선정하였다. 남아시아(75°~115°E, 0~40°N과 50°~75°E, 0~15°N)와 동아시아(115°~180°E, 20°~50°N) 지역의 각각 평균 강수 아노말리 시계열을 사용하여 회귀 분석하고 그 합을 원격 영향으로 정의한다. 여기서 전 지구 영향과 원격 영향을 나타내는 두 시계열 간의 분산 팽창 계수(Variance Inflation Factor)는 약 1이므로 서로 상호 독립적이다. 또한, 원

격 영향인 두 강수 시계열 간에도 상관관계가 매우 낮으므로 서로 독립적이다. 마지막으로 지역적 영향은 직접 측정하기 어렵기 때문에 총 영향에서 전 지구와 원격 효과를 빼서 지역 영향을 간접적으로 추정한다. 이 항에는 residual 효과와 지중해의 반 밀폐된(semi-closed) 특징 및 지중해를 둘러싼 복잡한 지형학 구조로 인한 영향도 포함된다. Figures 2-6의 왼쪽(오른쪽) 검은색 박스는 서쪽(동쪽) 지중해 지역으로 이해를 돕기 위해 표시하였다.

3. 결 과

3.1 기후학적인 여름철 지중해 특징

Figure 2은 1911년부터 2005년까지 여름철 기간에 대한 평균적인 지중해 지역의 기후[연직 바람, 강수량-증발량(P-E, water availability), 해수면 온도, 해양 일차 생산량] 분포이다. 여름철 평균적으로 지중해 전체 지역에 하강 기류가 나타나며, 특히 동쪽(22.5°~35°E, 27.5°~35°N) 지중해를 걸쳐 가장 강한 하강 기류가 위치한다(Fig. 2a). 강수량-증발량은 알프스산맥 지역을 제외하고 대체로 음의 값이며, 서쪽보다 동쪽 지중해에서 더 큰 음의 값을 보인다(Fig. 2b; Seager et al., 2014). 이러한 결과는 지리학적으로 유로-지중해 지역이 중위도에 위치하기 때문이며 하강기류의 공간 분포와 일치한다(Fig. 2a). 또한, 해수면 온도와 해양 일차 생산량도 하강 기류와 강수량-증발량과 동일한 경향의 공간 분포를 나타낸다(Figs. 2c, d). 경도 20°E를

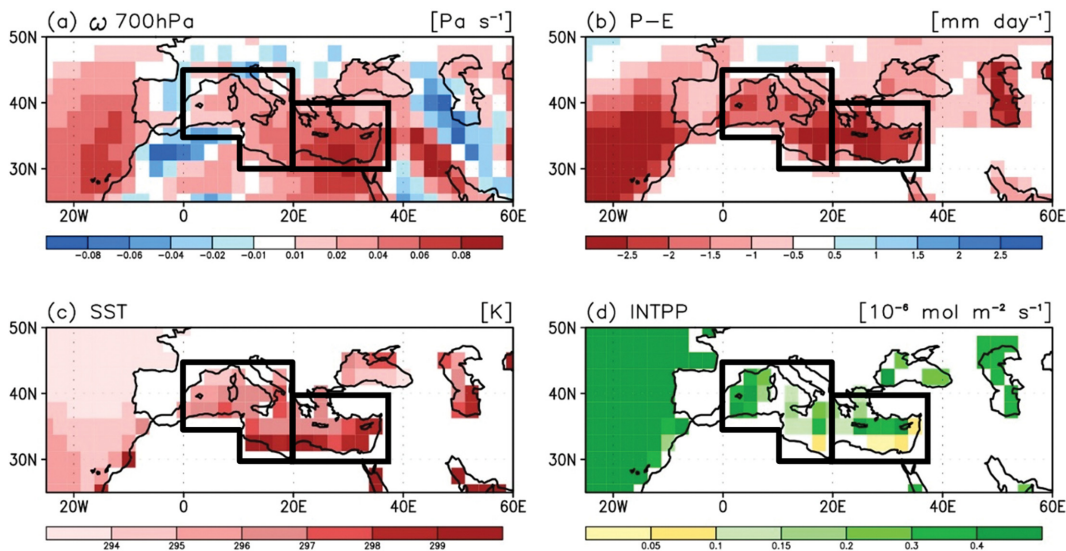


Fig. 2. Spatial pattern of the climatological (a) 700-hPa omega (Pa s^{-1}), (b) P-E (mm day^{-1}), (c) SST (K), and (d) INTPP ($10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) for the four-ESM model ensemble-mean during boreal summer. Left (right) boxes indicate the Western (Eastern) Mediterranean in each plot.

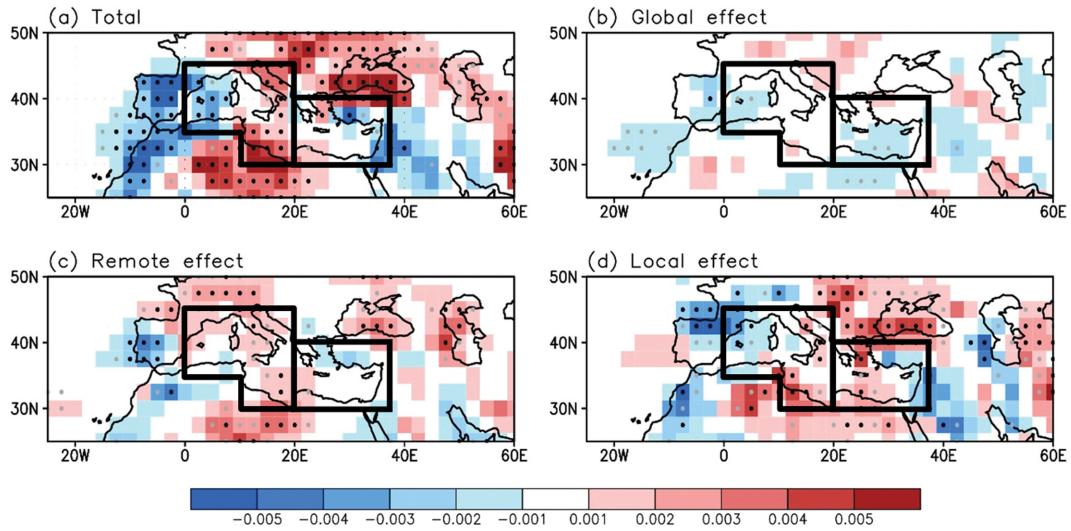


Fig. 3. 700-hPa omega anomaly (Pa s^{-1}) fields regressed against (a) Mediterranean SST index (total effect), (b) North Atlantic SST index (global effect), (c) monsoon indices (remote effect), and (d) residual component (local effect) for the period of 1911~2005 from the four-ESM model ensemble-mean in the CMIP5 historical simulation. Black (gray) dotted area in (a-d) indicates the statistically significant regions at the 90% (80%) confidence level. Left (right) boxes indicate the Western (Eastern) Mediterranean in each plot.

기준으로 서쪽 지중해에 비해 동쪽 지중해 지역의 해수면 온도가 더 높고(Fig. 2c; Shaltout and Omstedt, 2014), 해양 일차 생산량도 더 적다(Fig. 2d; Sammartino et al., 2015; Colella et al., 2016).

3.2 여름철 지중해 기후에 미치는 전 지구, 원격, 지역 영향

여름철 지중해 기후에 미치는 영향은 크게 전 지구, 원격, 지역적으로 고려할 수 있다. 기후 변화에 따라 각각의 영향들을 정성적으로 살펴보기 위해, 95년 기간에 대해 회귀 분석(regression analysis)을 수행하였다. Figures 3-6은 순서대로 회귀된 연직 바람, 강수량-증발량, 해수면 온도, 해양 일차 생산량 공간 분포이다. 그리고 검은색 점은 신뢰 수준 90%, 회색 점은 신뢰 수준 80%에서 유의한 지역을 의미한다.

먼저 연직 바람에 대한 총 영향은 $10^{\circ}\text{W}\sim 7.5^{\circ}\text{E}$ (포르투갈, 스페인, 모로코, 북알제리)와 35°E 부근(서중동) 지역에서 음의 연직 기류 아노말리를 보이고, 북아프리카(튀니지, 알제리, 리비아)와 이탈리아, 중유럽 지역에서 양의 연직 기류 아노말리를 보인다(Fig. 3a). 이는 하강 기류가 약간 서쪽으로($22.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{E}$ 에서 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{E}$) 이동하는 것을 의미한다. 전 지구 영향(Fig. 3b)은 동쪽 지중해와 대서양 근처 지역($20^{\circ}\text{W}\sim 5^{\circ}\text{E}$ 부근)에서 음의 연직 바람을 나타내므로 두 지역의 하강 기류 약화에 기여한다. 그리고 원격 영향은 포르투갈

과 스페인 일부를 제외하고 지중해 서쪽 지역($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{E}$)에서 양의 연직 바람 값을 보인다(Fig. 3c). 반면에 지역 영향은 전 지구 영향과 거의 반대로 동쪽 지중해의 하강 기류를 강화한다(Fig. 3d). 따라서 기후 변화에 따라 원격 영향은 서쪽 지중해의 하강 기류가 강화하고, 전 지구 영향은 동쪽 지중해 지역의 하강 기류를 약화시킨다. 하지만 지역 영향은 두 영향과 반대되는 경향으로 동쪽 지중해의 하강 기류 강화에 기여한다.

강수량-증발량의 경우, 총 영향은 대체로 유로-지중해 지역($0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{E}$)에서 음의 강수량-증발량 아노말리를 보이므로 육지에서 사용 가능한 물이 더 적어짐을 의미한다(Fig. 4a). 이는 지구가 온난화됨에 따라 아열대 건조대가 북쪽으로 이동 또는 확장된다는 연구와 일치한다(Scheff and Frierson, 2012; Seager et al., 2014; Alessandri et al., 2014). 총 영향 중 서쪽 지중해와 유럽 지역의 건조함은 원격 영향에서 뚜렷하다(Fig. 4c). 반면 지역 영향은 동쪽 유럽 지역에서 건조함이 두드러지므로 원격 영향과 전체적으로 상반되는 강수량-증발량 공간 분포를 보인다(Fig. 4d). 정확하게 변화 위치가 일치하지 않지만 이러한 결과는 하강 기류의 공간 분포 결과와 비슷하다(Figs. 3c, d). 한편 전 지구 영향은 45°N 부근 유럽 지역에서 건조해지는 경향을 약하게 보인다(Fig. 4b). 위의 강수량-증발량 결과들은 거의 강수량 결과와 동일하므로(그림 미제시)

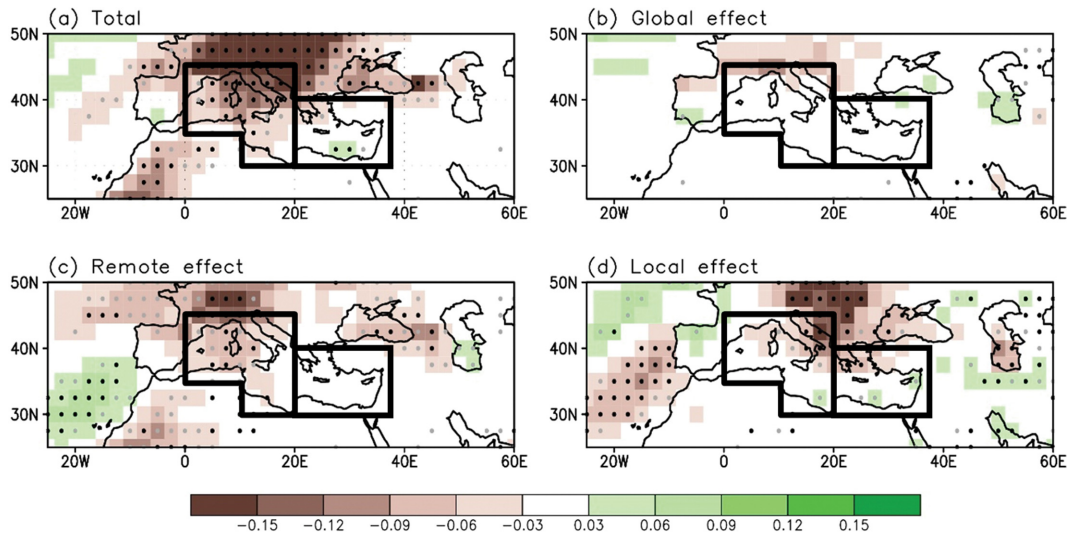


Fig. 4. Same as Fig. 3, but for the P-E anomaly (mm day^{-1}).

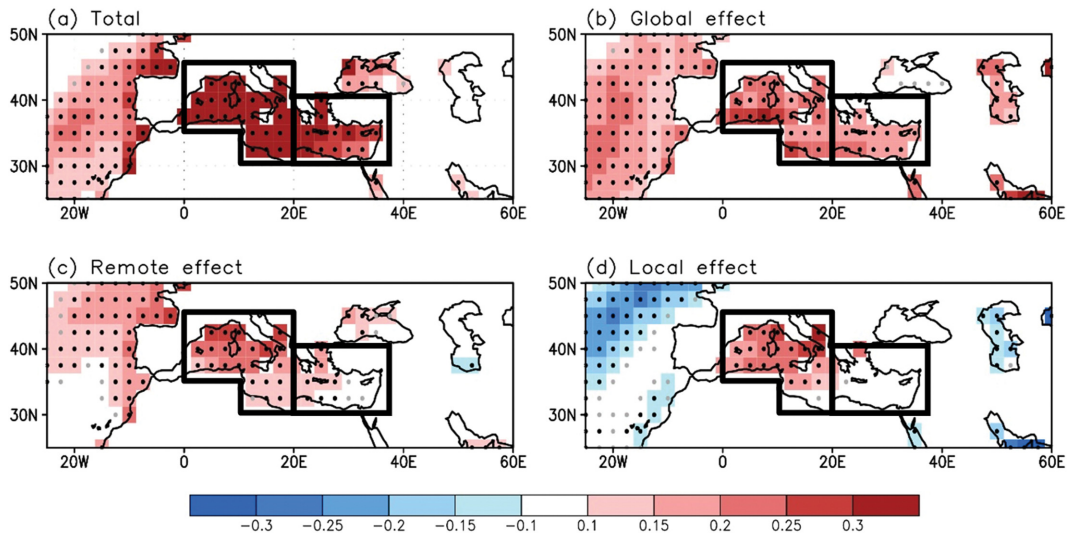


Fig. 5. Same as Fig. 3, but for the SST anomaly (K).

지중해 지역의 물순환 변화에 증발량보다 강수량의 변화가 중요하다는 것을 제시한다(Mariotti et al., 2008). 회귀된 다른 변수와 비교하여 지중해의 해수면 온도 아노말리는 모든 영향에서 비대칭 분포를 보인다(Fig. 5). 전 지구 영향은 전체 지중해 지역에서 증가하는 해수면 온도 아노말리를 보이며 서쪽 지중해 지역에서 그 특징이 더 뚜렷하다(Fig. 5b). 원격 영향은 전 지구 영향보다 크기는 약하지만 거의 비슷한 비대칭적인 공간 분포를 보인다(Fig. 5c). 또한, 지역 영향도 동쪽에 비해 서쪽 지중해에서 상대적으로 더 큰

양의 해수면 온도 아노말리를 보이며 특히 이탈리아를 둘러싼 해안 지역의 해수면 온도 증가가 뚜렷하다(Fig. 5d). 위의 해수면 온도 결과는 회귀된 용존 산소량 공간 분포와 거의 일치한다(그림 미제시). 마지막으로 해양 생태계에 더 중요한 변수인 해양 일차 생산량은 해수면 온도와 다른 결과를 나타낸다(Fig. 6). 전 지구 영향은 지중해의 전역에서 음의 해양 일차 생산량 아노말리를 보인다(Fig. 6b). 이는 해양 일차 생산량이 감소함을 의미한다. 그러나 원격 영향은 동쪽 지중해 지역보다 서쪽 지중해 지역에서 해

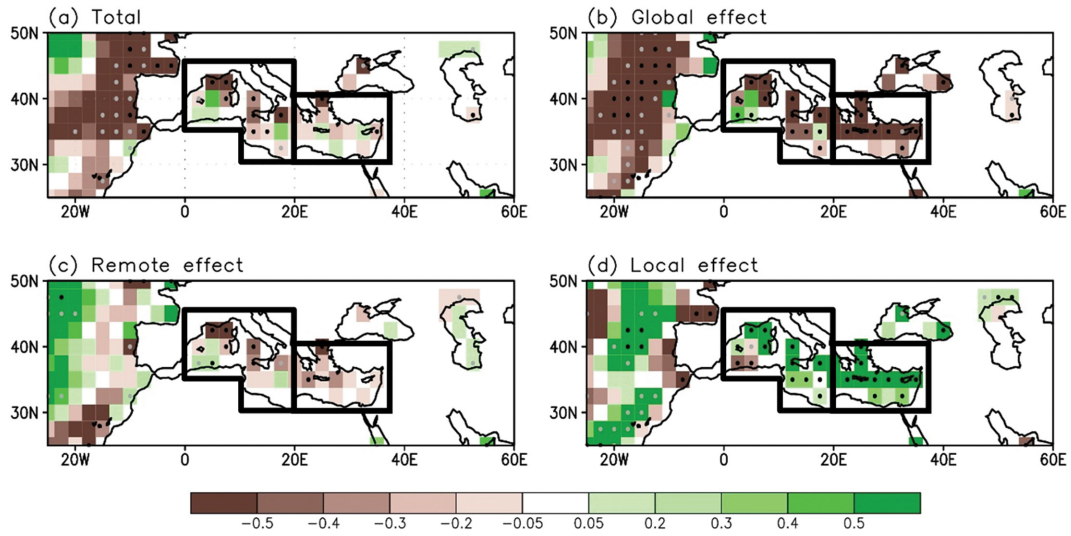


Fig. 6. Same as Fig. 3, but for the INTPP anomaly ($10^{-8} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

양 일차 생산량의 큰 감소를 보이며 약간 비대칭적인 공간 분포를 보여준다(Fig. 6c). 이 특징은 해수면 온도 공간 분포와 일치한다(Fig. 5c). 또한, 이러한 결과는 총 영향의 결과와 매우 비슷하다(Fig. 6a). 지역 영향은 다른 영향들과 반대로 증가된 해양 일차 생산량을 보인다(Fig. 6d). 일반적으로 바닷물이 따뜻해지면, 물에 용해되는 산소량이 줄어든다. 그리고 해수의 연직 구조가 안정화되어 해수 표층으로 영양분이 공급될 수 없다. 따라서 플랑크톤 농도나 어업 개체군(fish population)이 감소하게 될 것이다(Doney, 2006; Lewandowska et al., 2014). 이러한 과정을 통해 전 지구와 원격적 영향은 지중해 해양 생태계에 악영향을 끼칠 수 있을 것이다. 반면에, 지역적 영향 측면에서는 농업·산업 폐수(waste water)나 생활 하수로 인한 유기물 및 영양염이 유입되어 해양 일차 생산량이 증가한 것으로 추정된다. 이러한 유기물 및 영양염의 적당량 유입은 해양 생태계를 증진시킬 수 있지만 과도한 유입은 부영양화를 발생시켜 결과적으로 해양 생태계를 파괴시킬 수도 있다(Ludwig et al., 2010; Durrieu de Madron et al., 2011). 본 연구에서 사용된 4 모델 중 CESM1-BGC와 IPSL-CM5A-MR 모델의 해양 일차 생산성 값이 총, 전 지구, 원격, 지역적 영향의 회귀 분석 결과에 대체로 지배적이다(그림 미제시).

4. 요약 및 결론

본 연구는 지구 시스템 모형들의 현재 기후 자료를 사용하여 1911년부터 2005년까지 여름철 지중해 기후에 미치는 전 지구, 원격, 지역적 영향들을 각각 분

석하였다. 평균적으로 여름철 지중해 지역의 동쪽이 서쪽보다 고온 건조하고 강한 하강 기류와 적은 해양 일차 생산량을 보였다. 하지만 기후 변화에 따라 여름철 동쪽 지중해보다 서쪽 지중해 지역에서 하강 기류가 강화되고 표면 건조가 심해졌다. 그리고 서쪽 지중해 지역의 해수면 온도가 증가하고 해양 일차 생산량은 감소되었다. 이러한 결과는 최근 관측 및 재분석 자료의 결과와 일치한다(Kim et al., 2019). 총체적으로 서쪽 지중해 지역의 변화에 대해 각 영향의 정량적인 기여도는 전 지구적 영향 88%, 원격 영향 63%, 지역 영향 -44%이므로 세 영향 중 원격과 전 지구적 영향이 기후 변화에 따른 서쪽 지중해 지역의 변화에 많은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다. 그러나 두 영향과 다르게 지역적 영향은 동쪽 지중해 지역의 하강 기류를 강화하고 표면을 건조하게 했다. 이는 평균적인 지중해 대기의 공간 분포와 동일한 위상이다. 한편 증가한 해양 일차 생산량은 폐수나 하수가 유입되어 영양염이 증가했기 때문으로 추정된다(Ludwig et al., 2010; Durrieu de Madron et al., 2011). 본 연구 결과는 통계적으로 유의하나 향후에 수치 실험을 통해 각각의 영향들이 어떻게 지중해 기후를 변화시키는지에 대한 역학 메커니즘을 규명하는 연구가 필요할 것이다.

지중해는 기후 변화에 매우 취약한 지역으로 지중해의 지리적 위치 및 주변의 복잡한 지형적 요인 등으로 인해 지중해 기후에 대한 이해와 정확한 기후 예측이 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구의 기후 변화에 따른 지중해의 대기, 수문과 해양 변화 분석을 통해 지중해 기후에 대한 종합적인 이해를 향상시킬

수 있을 것으로 기대된다. 또한 이를 바탕으로 지중해 해양 생태계의 보전 및 관리에 도움을 줄 수 있을 것이다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음. 세심하고 유익한 조언을 해주신 두분의 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Alessandri, A., and Coauthors, 2014: Robust assessment of the expansion and retreat of Mediterranean climate in the 21st century. *Sci. Rep.*, **4**, 7211, doi:10.1038/srep07211.
- Alpert, P., and Coauthors, 2006: Chapter 2 Relations between climate variability in the Mediterranean region and the tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust. In P. Lionello et al. Eds., *Mediterranean climate variability, vol. 4*, Elsevier Science, 149-177.
- Anav, A., P. Friedlingstein, M. Kidston, L. Bopp, P. Ciais, P. Cox, C. Jones, M. Jung, R. Myneni, and Z. Zhu, 2013: Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 Earth system models. *J. Climate*, **26**, 6801-6843, doi:10.1175/JCLI-D-12-00417.1.
- Cherchi, A., H. Annamalai, S. Masina, and A. Navarra, 2014: South Asian summer monsoon and the eastern Mediterranean climate: The monsoon-desert mechanism in CMIP5 simulations. *J. Climate*, **27**, 6877-6903, doi:10.1175/JCLI-D-13-00530.1.
- Christensen, J. H., and Coauthors, 2013: Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In T. F. Stocker, et al. Eds., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1217-1308.
- Colella, S., F. Falcini, E. Rinaldi, M. Sammartino, and R. Santoleri, 2016: Mediterranean ocean colour chlorophyll trends. *PLoS One*, **11**, e0155756, doi:10.1371/journal.pone.0155756.
- Doney, S. C., 2006: Oceanography: Plankton in a warmer world. *Nature*, **444**, 695-696, doi:10.1038/444695a.
- Durrieu de Madron, X., and Coauthors, 2011: Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean. *Prog. Oceanogr.*, **91**, 97-166, doi:10.1016/j.pocean.2011.02.003.
- EUMOFA, 2017: Monthly Highlights. No. 8/2017. 24 pp.
- Folland, C. K., J. Knight, H. W. Linderholm, D. Fereday, S. Ineson, and J. W. Hurrell, 2009: The summer North Atlantic Oscillation: past, present, and future. *J. Climate*, **22**, 1082-1103, doi:10.1175/2008JCLI2459.1.
- Frölicher, T. L., and C. Laufkötter, 2018: Emerging risks from marine heat waves. *Nat. Commun.*, **9**, 650, doi:10.1038/s41467-018-03163-6.
- Giorgi, F., 2006: Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- Kim, G.-U., K.-H. Seo, and D. Chen, 2019: Climate change over the Mediterranean and current destruction of marine ecosystem. *Sci. Rep.*, **9**, 18813, doi:10.1038/s41598-019-55303-7.
- Lewandowska, A. M., D. G. Boyce, M. Hofmann, B. Matthiessen, U. Sommer, and B. Worm, 2014: Effects of sea surface warming on marine plankton. *Ecol. Lett.*, **17**, 614-623, doi:10.1111/ele.12265.
- Ludwig, W., A. F. Bouwman, E. Dumont, and F. Lespinas, 2010: Water and nutrient fluxes from major Mediterranean and Black Sea rivers: Past and future trends and their implications for the basin-scale budgets. *Global Biogeochem. Cy.*, **24**, GB0A13, doi:10.1029/2009GB003594.
- Mariotti, A., and A. Dell'Aquila, 2012: Decadal climate variability in the Mediterranean region: roles of large-scale forcings and regional processes. *Clim. Dyn.*, **38**, 1129-1145, doi:10.1007/s00382-011-1056-7.
- _____, N. Zeng, J.-H. Yoon, V. Artale, A. Navarra, P. Alpert, and L. Z. X. Li, 2008: Mediterranean water cycle changes: transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations. *Environ. Res. Lett.*, **3**, 044001, doi:10.1088/1748-9326/3/4/044001.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, and J. Kent, 2000: Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, **403**, 853-858, doi:10.1038/35002501.
- Nykjaer, L., 2009: Mediterranean Sea surface warming 1985-2006. *Clim. Res.*, **39**, 11-17, doi:10.3354/cr00794.
- Raicich, F., N. Pinardi, and A. Navarra, 2003: Teleconnections between Indian monsoon and Sahel rainfall and the Mediterranean. *Int. J. Climatol.*, **23**, 173-186, doi:10.1002/joc.862.
- Rodwell, M. J., and B. J. Hoskins, 1996: Monsoons and the dynamics of deserts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 1385-1404, doi:10.1002/qj.49712253408.
- Sammartino, M., A. Di Cicco, S. Marullo, and R. Santol-

- eri, 2015: Spatio-temporal variability of micro-, nano- and pico-phytoplankton in the Mediterranean Sea from satellite ocean colour data of SeaWiFS. *Ocean Sci.*, **11**, 759-778, doi:10.5194/os-11-759-2015.
- Schar, C., P. L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M. A. Liniger, and C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, **427**, 332-336, doi:10.1038/nature02300.
- Scheff, J., and D. M. W. Frierson, 2012: Robust future precipitation declines in CMIP5 largely reflect the poleward expansion of model subtropical dry zones. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L18704, doi:10.1029/2012GL052910.
- Seager, R., H. Liu, N. Henderson, I. Simpson, C. Kelley, T. Shaw, Y. Kushnir, and M. Ting, 2014: Causes of increasing aridification of the mediterranean region in response to rising greenhouse gases. *J. Climate*, **27**, 4655-4676, doi:10.1175/JCLI-D-13-00446.1.
- Seo, K.-H., and J. Ok, 2013: Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP3 models: Results from the best model ensemble. *J. Climate*, **26**, 1807-1817, doi:10.1175/JCLI-D-12-00109.1.
- _____, _____, J.-H. Son, and D.-H. Cha, 2013: Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models. *J. Climate*, **26**, 7662-7675, doi:10.1175/JCLI-D-12-00694.1.
- Shaltout, M., and A. Omstedt, 2014: Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia*, **56**, 411-443, doi:10.5697/oc.56-3.411.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Tyrlis, E., J. Lelieveld, and B. Steil, 2013: The summer circulation over the eastern Mediterranean and the Middle East: influence of the South Asian monsoon. *Clim. Dyn.*, **40**, 1103-1123, doi:10.1007/s00382-012-1528-4.
- Tzanatos, E., D. E. Raitzos, G. Triantafyllou, S. Somarakis, and A. A. Tsonis, 2014: Indications of a climate effect on Mediterranean fisheries. *Clim. Change*, **122**, 41-54, doi:10.1007/s10584-013-0972-4.
- Volosciuk, C., D. Maraun, V. A. Semenov, N. Tilinina, S. K. Gulev, and M. Latif, 2016: Rising mediterranean sea surface temperatures amplify extreme summer precipitation in central Europe. *Sci. Rep.*, **6**, 32450, doi:10.1038/srep32450.