

Original Article

2011-2020년 한국 연안의 용존무기영양염 시공간적 변동

이준영¹ · 이용우² · 박미옥³ · 류수연¹ · 명보라⁴ · 김부근⁵ · 정동주^{6,7,†}

¹부산대학교 해양학과 대학원생

²해양환경공단 해양수질처 차장

³해양환경공단 해양수질처 과장

⁴부산대학교 미래지환경연구소 박사후 연구원

⁵부산대학교 해양학과 교수

⁶부산대학교 미래지환경연구소 조교수

⁷부산대학교 해양학과 조교수

Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Nutrients in the Korean Coastal Waters from 2011 to 2020

Junyoung Lee¹, Yong-Woo Lee², Mi-Ok Park³, Sooyeon Ryu¹, Bora Myeong⁴,

Boo-Keun Khim⁵, and Dongjoo Joung^{6,7,†}

¹Graduate Student, Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea

²Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Department,

Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

³Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Department,

Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

⁴Post-Doctorate, Institute for Future Earth, Pusan National University, Busan 46241, Korea

⁵Professor, Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea

⁶Assistant Professor, Institute for Future Earth, Pusan National University, Busan 46241, Korea

⁷Assistant Professor, Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약

급격한 기후변화와 인간 활동의 증가는 연안역의 영양염 분포 변동에 큰 영향을 미치고 있으며, 이는 부영양화, 빈산소 수괴 등 환경문제를 일으켜 연안 생태계에 악영향을 주고 있다. 그럼에도 불구하고, 연안역 영양염의 장기 변동에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 10년(2011-2020년)에 걸쳐 한국 연안역의 표-저층수 영양염 변동 경향을 조사하고, 영양염 분포에 영향을 주는 요인을 살펴보았다. 한국 주변 국가의 연안에서 관찰된 급격한 영양염 농도 변동 추세와는 달리 한국 연안의 변동은 약하지만 서해연안은 DIN이 감소하고, DIP가 증가했으며, 남해연안은 DIP가 증가했고, 동해연안은 저층수에서만 DIN과 DIP가 증가했다. 이러한 약한 변동으로 표층수 N/P 비 변동도 약한 감소 추세를 보였다. 따라서, 한국은 기후변화로 인한 영양염 변동은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 주성분 분석을 통해 영양염을 비롯한 환경인자(DIN, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, TN, DIP, TP, DO depletion, pH, 수온, 염분, 클로로필)들의 관계를 분석한 결과, 담수를 통한 유입뿐만 아니라 수온 상승과 용존산소량 감소로 퇴적물로부터 재광물화 및 용출 등 해수 내 생지화학적 과정이 영양염 분포에 영향을 주는 것으로 나타났다. 전 세계적으로 연안환경 변화에 따른 영양염 분포 변동이 관찰되고 있어, 장기적으로 한국 연안에서도 영양염 분포가 변동될 것으로 예상된다. 따라서, 가속화되는 기후변화와 인간 활동 증가가 연안 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 영양염의 장기 변동을 파악하고, 지속적인 모니터링 등 관리가 필수적이다.

Abstract – Rapid climate change and human activities cause significant environmental shifts, including eutrophication and low oxygen levels in coastal waters. However, there is a lack of long-term studies on nutrient changes in coastal areas, particularly in Korea, where industrial and agricultural activities are heavily concentrated. This study investigates the decade long (2011-2020) variations in nutrient concentrations specifically dissolved inorganic

†Corresponding author: dongjoo.joung@pusan.ac.kr

nitrogen (DIN) and phosphorus (DIP) in the surface and bottom waters of Korean coasts, along with the factors influencing these changes. The findings reveal slight declines in DIN and DIP increased on the west coast, DIP increased on the south coast, and both DIN and DIP increased in the east coast's bottom waters. These changes contributed to a slight decrease trend in the surface water N/P ratio. Principal component analysis suggests that nutrient distributions are primarily influenced by freshwater input and remineralization processes in sediments and/or bottom waters, regulated by seawater density. As global coastal eutrophication and hypoxia expanded, similar trends are expected in Korea, highlighting the need for long-term monitoring to address the impacts of climate change and human activities on coastal ecosystems.

Keywords: Nitrogen(질소), Phosphorus(인), N/P ratio(질소/인 비), Long term variation(장기 변동), Korean coastal area(한국 연안)

1. 서 론

영양염은 식물플랑크톤 성장 필수 인자로, 생태계에서 생산성을 결정하는 주요한 역할을 할 뿐만 아니라, 식물플랑크톤 성장을 통한 이산화탄소 흡수를 증가시킴으로 기후변화에도 아주 중요한 역할을 한다. 해수 내 영양염 분포에 영향을 미치는 주요 생지화학적 반응은 생물 흡수, 재광물화, 침전, 이온교환 등이 있다. 예를 들어, 용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN)는 질산염(NO_3^-), 아질산염(NO_2^-), 암모늄(NH_4^+)으로 구성되어 있으며, 광합성 및 호흡으로 공급/제거되고, 미생물 활동에 의한 질산화(nitrification), 탈질산화(denitrification) 작용으로 분포가 조절된다(Herbert[1999]). 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus)은 주로 인산염(PO_4^{3-}) 형태로 존재하며, 광합성, 호흡, 부유입자물질에 대한 흡착 및 탈착 과정에 의해 분포가 주로 조절된다.

연안 지역은 전 세계 해양 면적의 10%를 차지하며, 해양 일차생산의 약 25%를 차지하기 때문에, 연안에서 영양염의 분포와 변화를 파악하는 것은 생태계 건강성과 기후변화 추세를 이해하는데 아주 중요하다. 연안의 영양염 분포는 인간 활동과 기후변화의 큰 영향을 받으며, 특히, 강 하구역은 강 유역에 발달한 농지 등에서 사용한 영양염이 과도하게 유입되어 부영양화가 보고되고 있다(Davidson *et al.*[2014]). 실제로 영양염 과잉 유입으로 인한 유해 조류 대발생의 경제적 손실은 1990년대 미국에서 연간 약 \$ 82 million으로 보고되었으며, 한국에서는 1995년에 최대 규모인 764억 원의 피해가 발생했다고 보고되었다(Hoagland and Scatosta[2006]; Kim[2007]). 부영양화는 식물플랑크톤 대증식을 야기하고, 이들의 사체는 침강하여 저층에서 박테리아에 의해 분해된다. 이 과정은 산소를 고갈시켜 저층에 빈산소 환경을 형성하고, 해수/퇴적층 내 재광물화 등 생지화학적 과정을 통해 영양염 분포에 영향을 미칠 수 있다(Meire *et al.*[2013]). 게다가, 빈산소수괴는 기존 퇴적층에 존재하던 산화-환원대를 퇴적물 상부 혹은 수층으로 이동시켜, 기존에 유입되어 퇴적층에 갇힌 영양염(Legacy nutrients)을 재용출시킬 수 있고(Chen *et al.*[2018]), 수직 혼합 및 해류를 통해 표층으로 재유입 되어 부영양화를 지속시킬 수 있다고 보고되었다(Joung and Shiller[2016]). 부영양화에 따른 저층 빈산소수괴는 저층 내 독소를 발생시켜 생물 다양성을 감소시킨다고 알려져 있으며(Shin *et al.*[2021]), 또한, 퇴적층으로부터 온실기체(예, 이산화탄소, 메탄)가 해수 및 대기로 유

입되어, 기후변화와 해양 산성화에도 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Breitburg *et al.*[2018]; Argentino *et al.*[2021]). 따라서, 현재 급속하게 증가하고 있는 빈산소 지역과 기간을 고려하면, 부영양화에 따른 급격한 생태계 변화가 예상된다.

기후변화는 해수면 상승, 수온 상승, 해양 산성화, 엘니뇨, 태풍 세기 변화 등 해양 환경에 악영향을 끼치는 것으로 보고되었다(WMO [2022]). 또한, 기후변화에 따른 강수량 증가, 농지의 잦은 침수 등으로, 연안으로 더욱더 많은 영양염이 유입되고 생태계 변동이 나타날 것으로 예상된다(Bates *et al.*[2008]). 최근 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 6차 보고서에 의하면, 지난 10년(2011-2020년) 동안 해수 표층 온도는 0.88°C 상승하였고, 해수면은 매년(2006-2018년) 3.7 mm 상승하였다. 이러한 변화는 해수 성층화를 강화하여, 빈산소수괴를 가속하는 역할을 하고, 영양염 재용출 및 생태계 변동을 유발할 것으로 예상된다.

인간 활동과 기후변화로 연안 영양염 분포 변동이 심해지고 있음에 따라, 미국, 중국을 비롯한 다른 나라에서는 영양염을 비롯한 생태계 장기 모니터링을 실시하고 있다(예, Rabalais *et al.*[2014]; Dai *et al.*[2023]). 그러나, 한국 연안에서 영양염의 장기적인 변동을 조사한 연구는 상대적으로 적으며, 특히 해역 전체를 비교한 연구는 아주 적다. 한국은 연안을 따라 공장, 폐수처리시설, 양식장이 많이 존재하기 때문에 영양염이 유입될 가능성이 높고(Woo *et al.*[1999]; Lee *et al.*[2006]), 특히, 서해안과 남해안의 천수만, 마산만, 진해만, 광양만, 금강 하구 등에서는 영양염 유입으로 인한 부영양화가 자주 보고되었다(Cho *et al.*[1998]; Yang *et al.*[1999]; Lee *et al.*[2001]; Kim and Kim[2002]; Kim *et al.*[2005]). 최근, Park *et al.*[2023]에 의해 수행된 한국 전체(서해, 남해, 동해) 해역의 연안과 외양에서 표층수 영양염의 장기적인(1995-2021년) 변화 연구에 따르면, 서해역 모두 DIN 농도는 감소하는 경향을 보이고, 남해 및 동해에서는 DIP 농도가 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 담수를 통한 육상 기원 영양염 유입량이 감소한 것을 원인으로 제시하였다. 하지만, 이 연구는 표층수 영양염 농도에 국한되어 있어, 저층에서 발생하는 재광물화나 표-저층 혼합에 대한 영향이 상대적으로 고려되지 않았다. 따라서, 본 연구는 해양환경공단의 데이터를 이용하여 최근 10년간(2011-2020년) 한국 연안의 장기적인 영양염 분포 변동과 분포에 영향을 주는 요인을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 데이터

전국 연안 표-저층수 영양염의 장기 변동 추세를 분석하기 위하여 해양환경공단(<https://www.meis.go.kr>)에서 수행한 2011-2020년 분기별(2월, 5월, 8월, 11월) 해양환경측정망 운영 자료를 활용하였다. 본 연구에서는 용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN), 질산염(NO_3^-), 아질산염(NO_2^-), 암모늄(NH_4^+), 총질소(Total Nitrogen; TN), 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus; DIP), 총인(Total Phosphorus; TP), 수온, 염분, 용존산소량(Dissolved oxygen; DO), pH, 클로로필(Chlorophyll-a; Chl-a)의 총 12개의 항목으로 용존무기영양염의 장기적인 변동과 분포를 파악하였다. 모든 시료의 채취, 보관, 분석은 해양환경관리법 제10조의 규정에 의거한 <해양환경공정시험기준>에 따라 실시하였다(<https://www.meis.go.kr>). 또한, 해수의 산소 소비 혹은 생물학적 활동을 보다 직접적으로 해석할 수 있는 산소 결핍(Dissolved oxygen depletion; DO depletion)을 사용하였으며, 이는 수식 (1)과 같이 계산하였다. 강 유량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)의 2011-2020년 월별 데이터(한강, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강)를 이용하였다.

$$\text{DO depletion (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Observed DO}}{\text{Saturation DO}}\right) \times 100 \quad (1)$$

2.2 연구 해역

연구 해역은 전국 연안으로 서해(해남~인천), 남해(울산~진도), 동해(거진~감포)로 구분하여 정의하였다(Fig. 1). 서해의 경우 85-105개(총 3,996개) 정점 데이터를 사용하였으며, 평균 수심과 최대 수심은 각각 15 m, 55 m 이었다. 서해는 수심이 비교적 얇고 조차가 큰 해역으로 알려져 있고, 한강, 영산강, 금강과 같은 큰 강이 존재하여 동해와 남해에 비해서 강을 통한 물질 유입이 활발한 것이 특징이다. 남해는 135-184개(총 6,744개) 정점 데이터를 사용하였으며, 평균 수심과 최대 수심은 각각 20 m, 54 m 이었다. 남해는 많은 반 폐쇄성 만(bay)과 섬이 존재하는 리아스식 해안으로 이루어져 있으며, 서쪽에는 섬진강, 동쪽에는 낙동강이 존재한다. 동해는 62개(총 2,564개) 정점 데이터를 사용하였으며, 평균 수심과 최대 수심은 각각 32 m, 78 m 이었다. 동해는 서해와 남해에 비해 강의 유입이 거의 없고, 동해의 중부 및 남부 연안 해역은 용승이 활발하다고 알려져 있다(Yoo and Park[2009]).

2.3 통계 분석

주성분 분석(Principal Component Analysis) 및 이동평균(Moving Average)은 통계프로그램(IBM SPSS Statistics 26.0)을 이용하였다. 이동평균법은 데이터의 추세를 파악하는 방법의 하나로, 일정 기간의 평균값을 계산하여 데이터 변동성을 줄여 주기적인 변동을 제거하고 장기적인 추세를 파악하는데 유용하다(Heo[2013]). 이러한

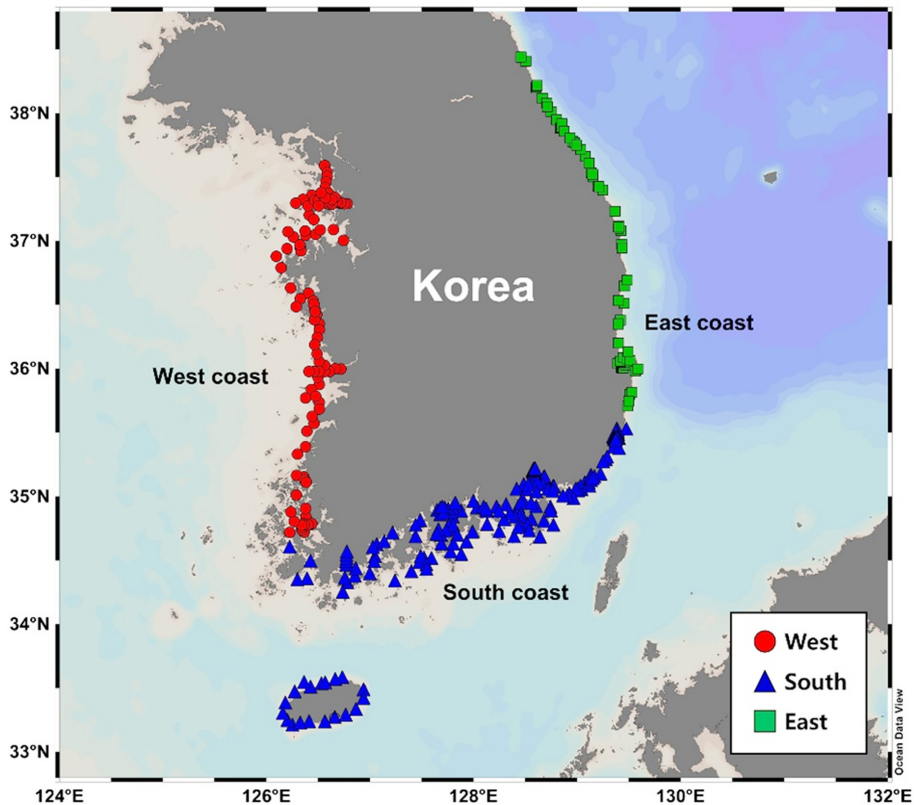


Fig. 1. Locations of sample collection sites. The red circles, blue triangles, and green squares represent sample collection sites from the west, south, and east coasts of Korea, respectively.

추세의 신뢰성은 유의수준(P-value)을 통해 검증하였다.

주성분 분석은 2개 이상의 변수 간 관계를 동시에 분석하는 통계 기법인 다변량 분석 중 하나이다. 변수 간 차원을 축소하고 시각화 하여, 변수 간 관계를 비교적 쉽게 해석할 수 있다(Jolliffe[2002]). 본 연구에서는 영양염류와 환경인자를 포함한 총 12항목(DIN, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, TN, DIP, TP, DO depletion, Chl-a, salinity, temperature, pH)을 이용하여 주성분 분석을 실시하였다. 이 방법은 상관행렬을 이용하여 각 변수를 표준화하는 방식으로 각 인자에 동일한 가중치를 부여함으로써, 단위 차이로 인한 잠재적 편향을 제거한다(Ale *et al.*[2024]). 주성분 분석은, Kaiser-Meyer-Olkin 측도를 통한 주성분 적절성 여부를 조사한 결과, 모든 해역에서 0.5 이상(p<0.0001)으로, 주성분 분석 사용이 적절함으로 나타났다(Field[2000]). 주성분 분석을 통하여 12개의 항목을 베리맥스 회전방식(varimax rotation)을 이용하여 고유값(eigen value)이 1 이상인 성분 2개로 축소하였다(Ale *et al.*[2024]).

3. 결과 및 고찰

3.1 서해연안 영양염류 변동 특성 및 요인

한국 연안의 표층수 중 용존무기영양염(DIN, DIP)의 10년간 평균 농도는 각각 서해연안에서 각각 15.66±5.38 μM, 0.622±0.243 μM, 남해연안에서 6.19±3.19 μM, 0.352±0.155 μM, 동해연안에서 3.96±3.41 μM, 0.203±0.159 μM이었으며, 저층수에서는 서해연안에서 각각 14.00±4.22 μM, 0.625±0.245 μM, 남해연안에서 6.24±2.24 μM, 0.435±0.151 μM, 동해연안에서 5.96±2.08 μM, 0.409±0.147 μM로 나타났다(Table 1). 이 결과는 Lim *et al.*[2011]의 선행 연구 결과와 유사한 해역별 차이를 보였다. 조사기간 동안, 서해연안의 DIN은 표-저층수에서 각각 연간 0.80±0.04 μM, 0.56±0.04 μM(p<0.05, n=36) 감소하는 추세를 보였다(Fig. 2). 특히, DIN 농도 감소 경향은 8월에 가장 뚜렷했는데, 2011년-2018년 표-저층수에서 각각 연간 2.71±0.45 μM, 1.67±0.35 μM(p<0.05) 감소하는 경향이 보였다(Fig. 3a). 하지만, 2019-2020년은 감소하는 추세가 비교적 명확하게 나타나지 않았다. 이는 명확하지 않지만, 2018년 이후 DIN의 8월 분포가 비교적 안정화된 것으로 생각된다. 조사시기, 서해연안 표-저층수 수온 및 염분은 각각 연간 0.1°C, 0.1 증가하고(Fig. 2), 용존산소 농도는 0.7±0.1 μM, 0.6±0.1 μM 감소하는 추세를 보였다. DIN과 염분의 높은 음의 상관성(R²= 0.49, Fig. 4a)과 조사기간 동안, 강수량 감소에 따른 서해 강 유출량(Fig. 5)을 고려했을 때, DIN 감소는 연안역 강물 유입의 감소가 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Shimizu *et al.*[2011]). 수온 증가와 표-저층수 용존산소 농도가

감소하는 추세를 고려하였을 때, 탈질산화(denitrification)에 의해 DIN이 제거된 저층수의 수직 혼합 또한, 표-저층수 DIN 농도에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 이와 반대로, DIP 농도는 표-저층수에서 각각 연간 0.005±0.001 μM, 0.007±0.001 μM(p<0.05, n=36) 약하게나마 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2). 탈질산화 과정에 따른 DIN 농도 감소와는 반대로, DIP는 저층(혹은 퇴적층) 채광물화에 의해 용존 상태로 축적되고, 이후 큰 조차에 의한 수직 혼합으로 표층 DIP 농도 또한 증가한 것으로 생각된다.

서해연안 주성분 분석 결과, 인자들은, 두 주성분(제1, 2)으로 표층과 저층에서 각각 60.9%, 60.1% 설명이 가능하였다(Fig. 6a and 6b). 표층과 저층 모두 주성분 1은 영양염(DIN, TN, NO₃⁻, NH₄⁺, TP, DIP, NO₂⁻)과 염분의 연관성이 나타났으며, 주성분 2에서는 산소 결핍(DO depletion), pH와의 연관성이 나타난다. 주성분 1에서 용존무기영양염 전체와 염분의 강한 인자부하량을 갖는 것으로 보아 이들의 주된 기원은 앞서 설명하였듯이, 담수 유입이 주된 영향 요인일 것으로 판단된다. 서해는 다른 지역보다 상대적으로 많은 강이 존재함에 따라 담수 유입이 영양염 농도에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 주성분 2는 산소 결핍에서 양의 인자부하량, pH에는 음의 인자부하량이 나타나는 것으로 보아 서해는 퇴적물을 통한 공급이 활발한 환경일 것으로 판단되며, 영양염 분포에 두 번째로 큰 영향을 미친 것으로 해석된다. 즉, 산소가 고갈된 조건에서 DIP가 퇴적물로부터 용출되어 저층수로 공급되기 때문으로 생각된다(Cheon *et al.*[2012]).

3.2 남해연안 영양염류 변동 특성 및 요인

남해연안의 DIN 농도는 표-저층수 모두 통계적으로 유의한 추세가 나타나지 않았다(Fig. 7). 하지만, 2월에는 DIN 농도는 유의한 변동이 관찰되었는데, 2011-2018년 표-저층수에서 각각 연간 0.34±0.12 μM, 0.29±0.12 μM(p<0.05, n=8) 증가하는 경향이 나타났다(Fig. 3b). 하지만, 2019-2020년은 증가하는 추세가 비교적 명확하게 나타나지 않았다. 이는, 2018년 이후 DIN의 겨울철(2월) 분포가 비교적 안정화된 것으로 생각된다. 일반적으로 남해연안 겨울철 영양염 분포는 수직 혼합이 큰 역할을 하는 것으로 보고되었다(Lee[1999]). 하지만, 이 시기, DIP, 수온, 염분, 및 다른 환경인자들의 뚜렷한 변동 경향은 보이지 않았다. 따라서, 겨울철(2월) 남해연안 영양염 증가는 수직 혼합의 빈도가 증가하여 발생한 건지는 아직 명확하지 않다. DIP는 표-저층수에서 모두 연간 0.007±0.001 μM (p<0.05, n=36) 약하게나마 증가하는 추세가 나타났다(Fig. 7). 최근 남해연안 영양염 연구에서, Jeong *et al.*[2019]와 Kim *et al.*[2023]은 양식장 퇴적물과 배출수를 통한 유기물 유입이 저층 산소 소비를

Table 1. Mean (± standard deviation) concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorous (DIP). Units in μM

Location	DIN		DIP	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom
West Coast (n=85-105)	15.66 ± 5.38	14.00 ± 4.22	0.622 ± 0.243	0.625 ± 0.245
South Coast (n=135-184)	6.19 ± 3.19	6.24 ± 2.24	0.352 ± 0.155	0.435 ± 0.151
East Coast (n=62)	3.96 ± 3.41	5.96 ± 2.08	0.203 ± 0.159	0.409 ± 0.147

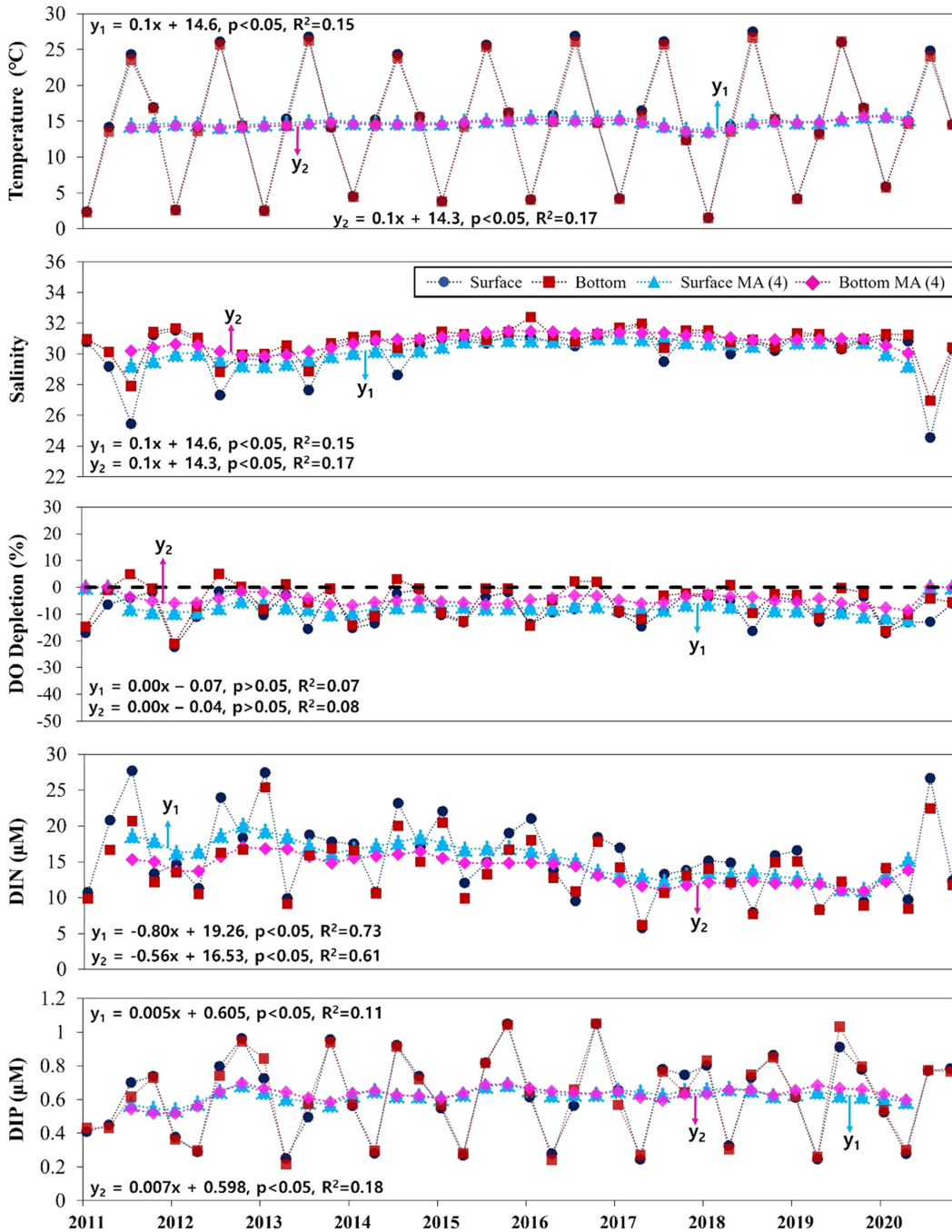


Fig. 2. Decadal changes (2011-2020) of monthly averages and moving averages (4) of water parameters (temperature, salinity, dissolved oxygen (DO) depletion, DIN, DIP) for the west coast of Korea (n=36). The linear equations y_1 and y_2 represent regressions in surface and bottom waters, respectively. Note that a positive value of DO depletion indicates oxygen consumption, while a negative value indicates oxygen production.

유발하여 연안 환경 빈산소수괴 발생에 영향을 주고 있다고 보고 하였다. 저층 빈산소수괴는 퇴적물에서 재광물화된 영양염의 해수 용출을 가속할 가능성을 시사한다. 따라서, 남해연안에서 증가한 DIP 농도는 저층으로부터 유입되었을 가능성이 있다. 다만, DIN의 경우는 DIP와 달리 퇴적물에서 재광물화 및 탈질산화(denitrification) 과정 등으로 생성 및 제거됨에 따라 일정한 추세가 나타나지 않는 것으로

판단된다(Seitzinger and Giblin[1996]).

남해연안 주성분 분석 결과, 인자들은 두 주성분으로 표층과 저층에서 각각 56.8%, 52.9% 설명할 수 있었으며, 표층과 저층에서 다소 다른 결과가 나타났다(Fig. 6c and 6d). 표층 주성분 1은 영양염(DIN, TN, NO_3^- , NH_4^+ , TP, DIP, NO_2^-)이 뭉쳐 나타나 이들의 기원이 같을 것으로 해석되며, 다른 인자들과 연관성은 나타나지 않

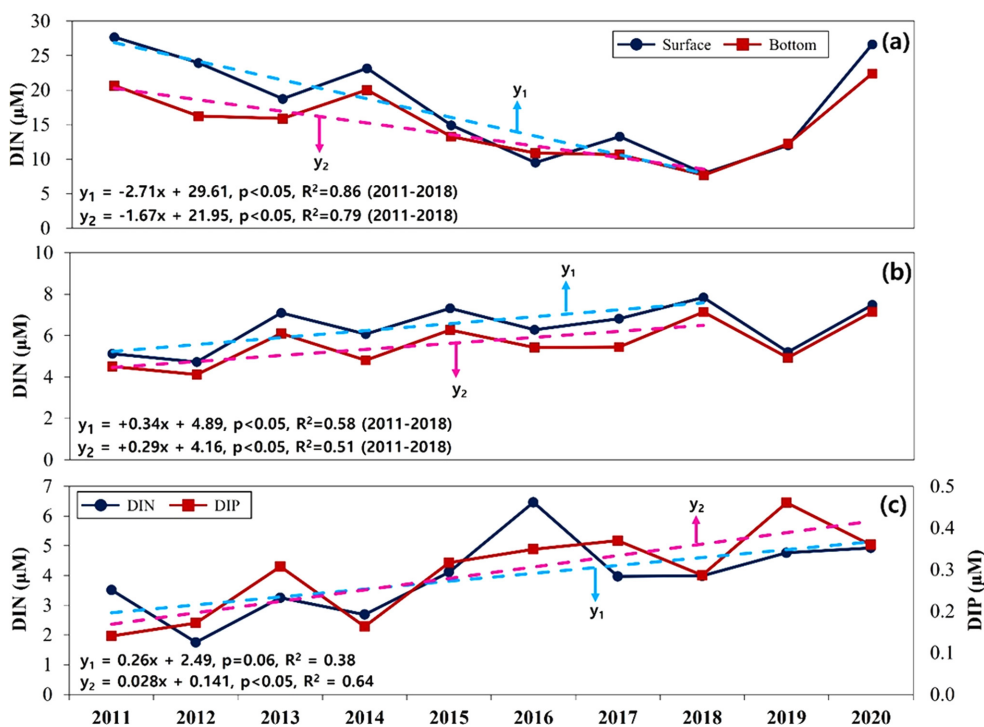


Fig. 3. Variations in average concentrations of (a) DIN in August (2011-2020) on the west coast (n=10), (b) DIN in February (2011-2020) on the south coast (n=10), and (c) DIN and DIP in bottom waters in August (2011-2020) on the east coast (n=10). In (a) and (b), the blue dashed line and equation y_1 represent regression for surface DIN, and the pink dashed line and equation y_2 represent regression for bottom water DIN. In (c), the blue dashed line and equation y_1 represent regression for bottom water DIN, and the pink dashed line and equation y_2 represent regression for bottom water DIP.

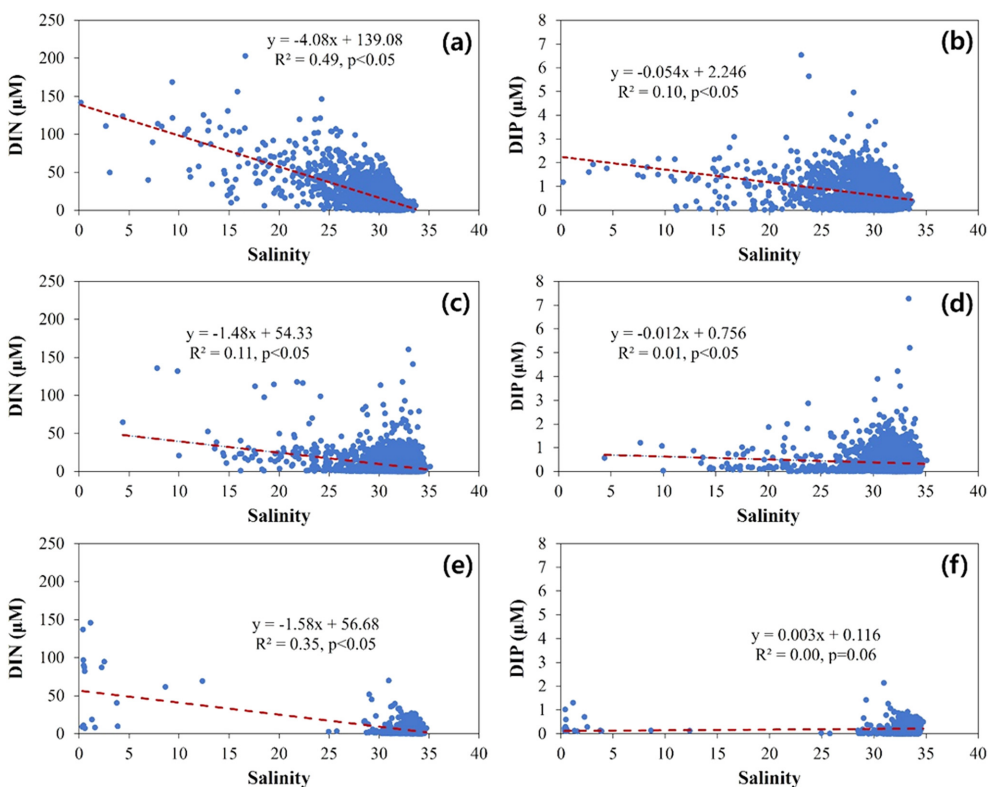


Fig. 4. Correlations between salinity and concentrations of DIN and DIP in surface waters from (a) and (b) the west (n=3996), (c) and (d) the south (n=6774), and (e) and (f) the east (n=2564) coasts of Korea. The left column shows DIN correlations, and the right column shows DIP correlations.

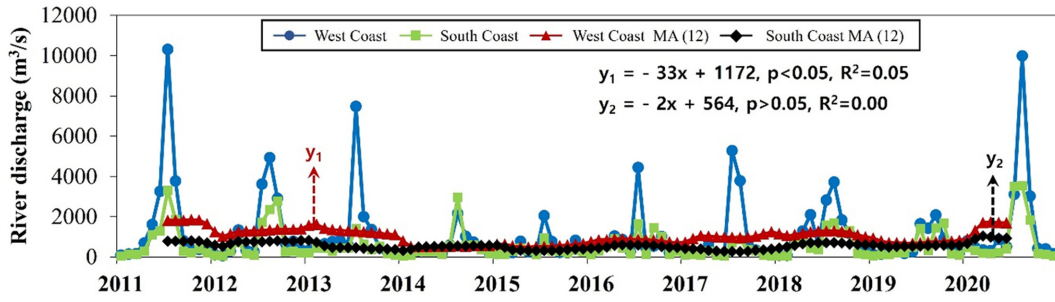


Fig. 5. Monthly river discharge and moving average (12) in Han, Geum, Yeongsan, Seomjin, and Nakdong rivers (n=108). The linear equations y_1 and y_2 represent regressions in west coast river (Han, Geum, Yeongsan river) and south coast river (Seomjin, Nakdong river), respectively.

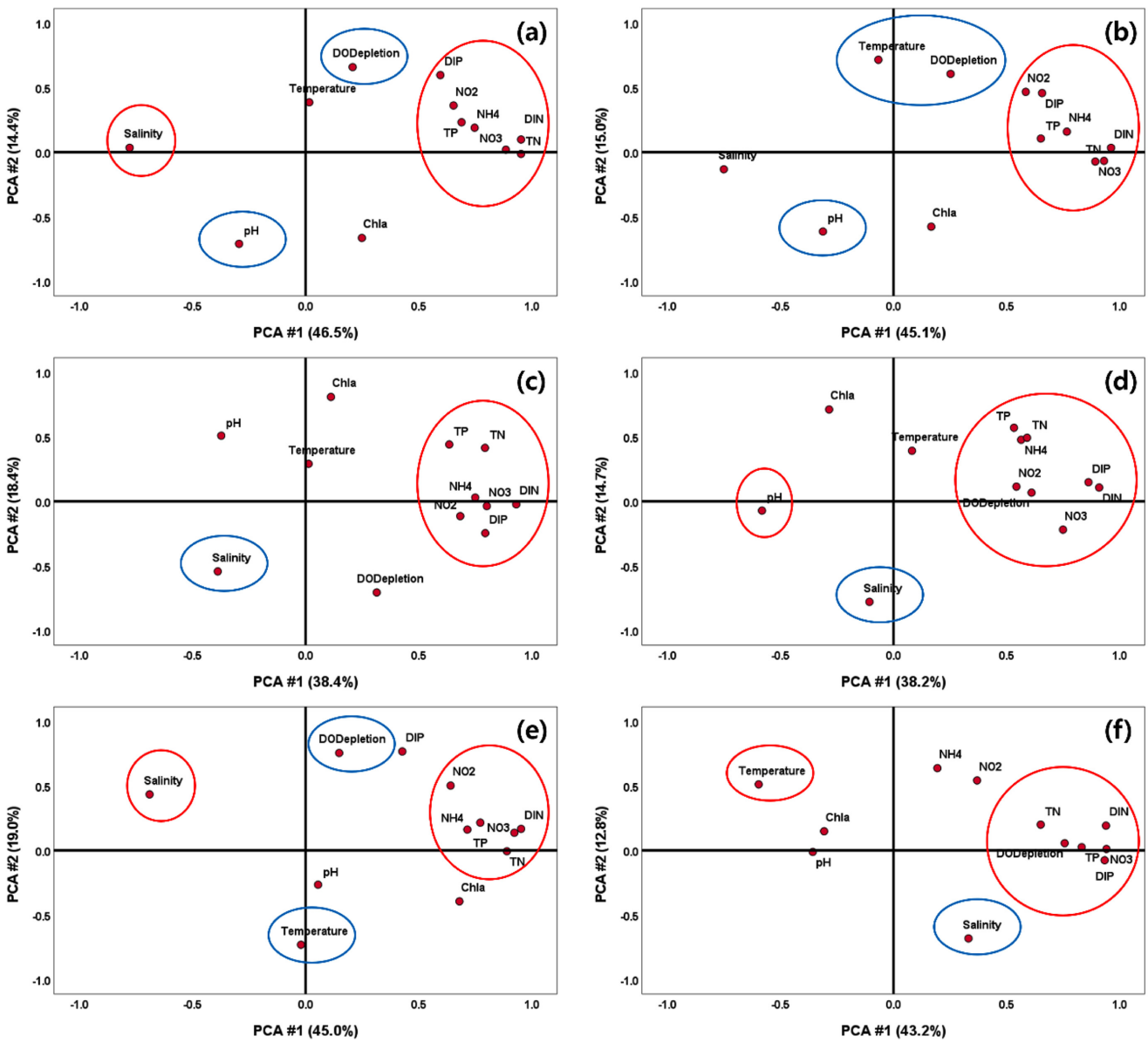


Fig. 6. Results of the principal component analysis (PCA) for the surface and bottom waters from (a) and (b) the west, (c) and (d) the south, and (e) and (f) the east coasts of Korea. Red circles represent factors with strong loadings in principal component 1, while the blue circles represent factors with strong loadings in principal component 2.

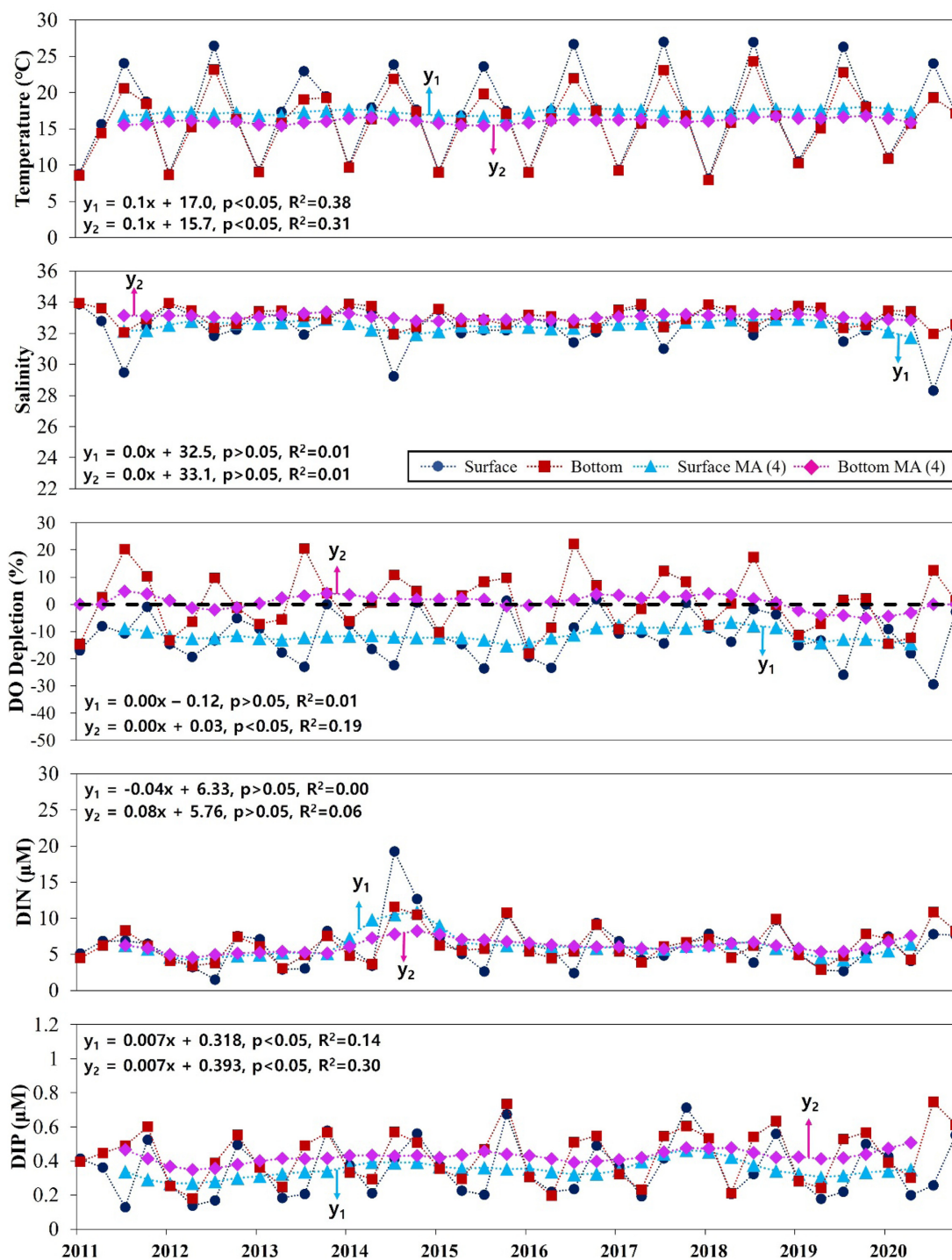


Fig. 7. Decadal changes (2011-2020) of monthly averages and moving averages (4) of water parameters (temperature, salinity, dissolved oxygen (DO) depletion, DIN, DIP) for the south coast of Korea (n=36). The linear equations y_1 and y_2 represent regressions in surface and bottom waters, respectively. Note that a positive value of DO depletion indicates oxygen consumption, while a negative value indicates oxygen production.

았다. 주성분 2에서는 염분의 음의 인자부하량이 나타나는 것을 통해, 남해 표층은 담수 유입이 활발한 환경일 것으로 해석되며, 영양염의 주된 기원은 담수일 것으로 생각된다. 남해 저층 주성분 1은 영양염(DIN, TN, NO_3^- , NH_4^+ , TP, DIP, NO_2^-)과 산소 결핍은 양의

인자부하량, pH는 음의 인자부하량을 갖는 것으로 보아 이들은 주로 퇴적물로부터 저층수로 공급되었을 것으로 판단된다. 남해연안은 2021년 기준 약 166,781ha 면적의 양식장이 존재하며, 이는 국내 양식장 면적의 약 78%로 세 해역 중 가장 넓다(KOSIS, <http://>

kosis.kr). 이러한 남해연안 양식장 배출수에서는 높은 영양염 농도가 보고되었다(Lee *et al.*[2000]) 특히, 남해연안은 양식장 배출수에서 다량의 유기물이 유입되고, 부영양화가 빈번하게 발생하여 유기물이 활발히 침강할 수 있는 환경이기 때문에(Lee *et al.*[2000]), 주로 저층의 유기물이 분해되어 저층수로 공급되는 과정을 통해 영양염 농도가 결정될 것으로 판단된다. 주성분 2에서는 염분에서 음의

인자부하량이 나타나는 것을 통해, 표층과 마찬가지로 저층에서도 담수 유입이 비교적 활발한 환경일 것으로 해석되며, 저층 영양염 분포에 두 번째로 큰 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

3.3 동해연안 영양염류 변동 특성 및 요인

동해연안 영양염 농도는 다른 해역보다 낮았는데, 서해, 남해연

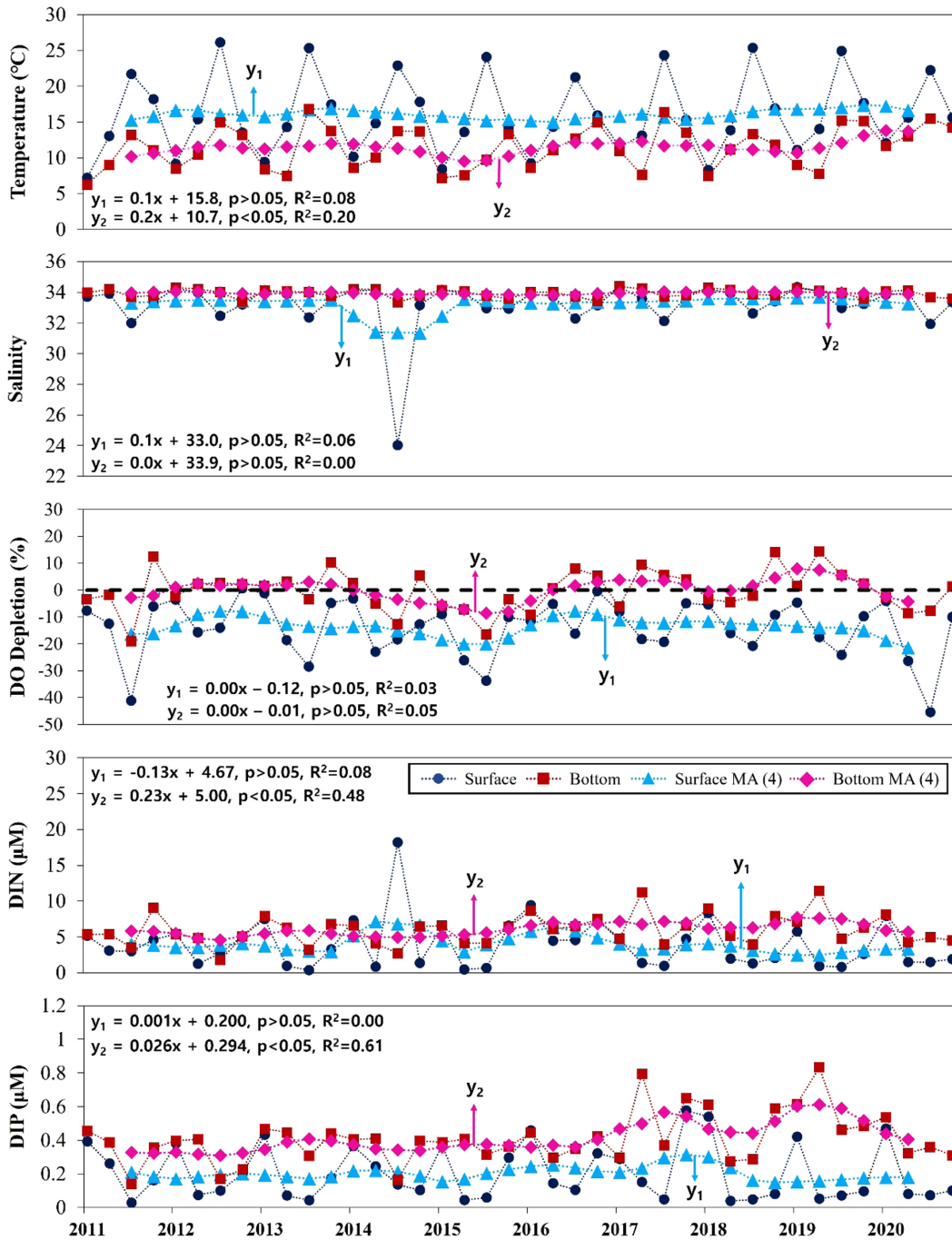


Fig. 8. Decadal changes (2011-2020) of monthly averages and moving averages (4) of water parameters (temperature, salinity, dissolved oxygen (DO) depletion, DIN, DIP) for the east coast of Korea (n=36). The linear equations y_1 and y_2 represent regressions in surface and bottom waters, respectively. Note that a positive value of DO depletion indicates oxygen consumption, while a negative value indicates oxygen production.

안과는 다르게, 큰 강이 없고 수심이 비교적 깊어, 저층으로부터 유입이 다른 두 지역보다 상대적으로 적기 때문으로 여겨진다. 동해 연안 표층 영양염 농도는 조사기간 동안 뚜렷한 추세가 나타나지 않았으나, 저층에서 DIN, DIP 농도는 각각 연간 $0.23 \pm 0.02 \mu\text{M}$, $0.026 \pm 0.002 \mu\text{M}$ ($p < 0.05$, $n = 36$) 증가하는 추세가 나타났다(Fig. 8). 이와 함께, 저층 수온이 연간 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 증가하고, 용존산소량이 연간 $1.9 \pm 0.4 \mu\text{M}$ 감소하는 추세가 나타난 것을 고려하면, 수층(혹은 저층)에서 재광물화 등의 영향이 원인일 수 있다. 특히, 저층수 영양염 농도 증가 경향은 8월에 가장 뚜렷했는데, 2011년-2020년 저층수 DIN, DIP 농도는 각각 연간 $0.26 \pm 0.12 \mu\text{M}$ ($p = 0.06$, $n = 10$), $0.028 \pm 0.007 \mu\text{M}$ ($p < 0.05$, $n = 10$) 증가하는 경향이 나타났다(Fig. 3c). 다만, 해당 기간 영양염을 제외한 다른 환경인자들은 뚜렷한 변동을 보이지 않았기 때문에, 8월 저층수 영양염 농도 증가의 원인은 명확하지 않다. 그러나, 동해는 다른 해역에 비해 표-저층 수온 차이가 크고, 연구 기간 내 성층화가 강화되어 왔음을 고려할 때(Shin[2019]), 수온약층의 성층화로 인해 저층에 영양염이 축적된 것이 이 시기 저층 영양염 농도 증가에 영향을 끼쳤을 가능성이 높다.

동해연안은 주성분 분석 결과, 인자들은 두 주성분으로 표층과 저층에서 각각 64.0%, 56.0% 설명이 가능하였다(Fig. 6e and 6f). 표층과 저층에서 다소 다른 결과가 나타났는데, 표층 주성분 1에서 영양염과 거의 모든 형태(species)의 영양염(DIN, NO_3^- , TN, NH_4^+ , TP, NO_2^-)이 뭉쳐 나타났다. 또한, 염분과 강한 양의 인자부하량이 나타나, 이들의 주된 기원은 담수 유입일 것으로 생각된다. 하지만, 동해연안은 큰 강이 존재하지 않고, 담수 유입은 작은 지류나 혹은 지하수로 유입된다고 알려져 있어(Kim *et al.*[2022]), 동해연안 표층 해수 영양염 분포의 주요한 원인은 지하수 유입이 큰 역할을 하는 것으로 판단된다. 주성분 2는 산소 결핍에서 양의 인자부하량, 수온에는 음의 인자부하량이 나타났는데, 수온이 낮고 낮은 산소량을 갖는 저층수의 특징으로 보아, 표층에서 두 번째로 큰 영향을 미치는 요인은 저층수를 통한 공급일 것으로 생각된다. 동해 저층 주성분 1에서 영양염(NO_3^- , DIN, DIP, TP, TN)과 산소 결핍은 양의 인자부하량, 수온은 음의 인자부하량, 주성분 2는 염분이 음의 인자부하량으로 나타났다. 이는, 동해 저층은 주로 퇴적물 혹은 수층 내 재광물화가 영양염 분포에 가장 큰 영향을 미치는 요인인 것을 시사하며, 또한, 제2 성분의 염분과 음의 상관관계를 고려하였을 때, 이전 연구 결과(예, Kim *et al.*[2022]) 유사하게 지하수 또한 일정 부분 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.4 한국 연안과 주변국 영양염 장기 변동 비교

한국 연안 해역의 약한(혹은 특정 계절에 국한된 변화) 장기간 영양염 변동은 국내 선행 연구와 다른 나라에서 보고된 경향과는 약간 다르다. 본 연구 결과, 표층수 영양염 감소는 서해의 DIN에서만 나타났으며, DIP는 아주 약하게나마 증가하는 추세가 나타났다. 하지만, Park *et al.*[2023]은 한국 연안 세 해역의 표층 DIN, DIP 농도가 급격히 감소하였다고 보고하였고, 이는 담수 영양염 고갈과 육상기원 영양염 유입 감소를 원인으로 밝혔다. Park *et al.*[2023]과 본 연구의 차이는 아마도 연구시기가 다르기 때문일 것으로 생각된다. 즉, 본 연구는 오염의 정도가 비교적 약한 최근 시기(2011-2020년)에 이루어졌으나, Park *et al.*[2023]은 1997-2021년까지 기간을 다루고 있어, 상대적으로 오염 정도가 심했던 2000년 전후 시기를 포함함에 따라 감소의 형태가 보다 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 본 연구와 중국 양쯔강 유역 연구 결과를 비교하면, 한국 연근해 영양염은 감소하는 추세가 나타남에 비해, 중국 연안해역에서는 급격하게 증가하는 추세가 보고되고 있다. 예를 들어, Li *et al.*[2007]은 동중국해의 양쯔강 유역에서 1980-1990년대까지 DIN, DIP 농도가 크게 증가하였다고 보고하였으며, 이는 화학공장 가동과 많은 양의 비료 사용으로 인해 양쯔강으로부터 영양염 유입이 증가한 것이 원인임을 밝혔다. Wang *et al.*[2019]는 보하이해에서 1990-2016년까지 DIN 농도가 증가하고 1978년-2016년까지 DIP 농도가 감소한 것을 관찰하였고, DIN의 증가는 비료 등 인위적 기원 유입의 영향으로, DIP의 감소는 자연적인 변화와 함께 오염원 변화의 영향을 원인으로 제시하였다. Li *et al.*[2015]는 중국 황해 남부 연안 해역에서 1980-2012년까지 약 30년간 DIN 농도가 증가하였다고 보고했는데, 이는 육상기원 영양염의 유입 증가를 원인으로 밝혔다. 이와 다르게, Shimizu *et al.*[2011]은 일본 서부 연안의 아사히강 유역에서 1978-2007년까지 약 30년간 DIN, DIP 농도가 감소한 원인을 기후변화로 강수량이 감소하여 강을 통한 영양염 전달이 감소했기 때문이라고 밝혔다. 본 연구에서도 한국 서해 연안해역의 DIN 감소는 강 유출량(혹은 강 유역 강수량)과 깊은 연관이 있을 것으로 판단된다. 종합하면, 한국 연안 해역의 영양염은 담수를 통한 육상기원 영양염 유입으로 결정될 뿐만 아니라, 양식장 등 인위적인 유입, 해수/퇴적물 내 재광물화 같은 생지화학적 과정에 영향을 받는 것으로 생각된다. 또한, 한국 내 수질 개선사업과도 관련이 깊은 것으로 판단되는데, Chang *et al.*[2012]는 연안오염총량관리제를 통해 마산만 수질 개선이 나타났다고 제시하였다. 즉, 각 국가의 서로 다른 영양염 장기 변동 추세는 인위적 기원 오염물질 유입과 더불어 지형적-생지화학적 요인과 기후변화 등에 영향을 받기 때문으로 판단된다. 하지만, 위 다른 나라의 연구 결과도 몇몇 지역에 국한된 연구이기 때문에 전체 해역에 대한 결과가 아님을 주의할 필요는 있다.

3.5 표층수와 저층수 N/P 비와 변동 추세

해역별 영양염 농도 변화는 각 해역의 제한영양염 변동을 야기한다. 일반적으로, 제한영양염은 Redfield ratio가 16 이하일 때 질소(N)가 식물플랑크톤의 성장을 제한할 수 있는 제한영양염으로, 16 이상일 때 인(P)을 제한영양염으로 추정한다(Corell[1999]). 이를 이용하여, 해역별 표층의 제한영양염을 판단하고, DIN/DIP 비의 장기적인 변동 추세를 확인하였다. 그러나, 이 N/P 비는 N과 P의 상대적 비율로, 두 영양염이 충분히 공급되는 해역은 N/P 비와 관계없이, DIN과 DIP 모두 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염으로 작용하지 않을 수 있다(Smith[1984]).

해역별 표층수 DIN/DIP 비의 평균은 서해연안(28.1 ± 10.7), 동해

Table 2. DIN/DIP ratios (\pm standard deviation) in surface and bottom waters during each sample collection period

DIN/DIP ratio		West Coast (n=85-105)	South Coast (n=135-184)	East Coast (n=62)
February	Surface	30.7 \pm 6.6	17.4 \pm 2.3	16.5 \pm 2.4
	Bottom	27.6 \pm 5.7	16.0 \pm 2.1	15.2 \pm 2.3
May	Surface	39.5 \pm 7.2	21.3 \pm 4.8	18.2 \pm 12.9
	Bottom	36.3 \pm 7.7	16.4 \pm 3.8	14.1 \pm 3.2
August	Surface	24.3 \pm 10.0	21.3 \pm 15.5	40.5 \pm 40.4
	Bottom	20.3 \pm 7.4	12.6 \pm 3.4	14.3 \pm 4.5
November	Surface	17.9 \pm 2.6	15.0 \pm 3.8	21.0 \pm 6.1
	Bottom	17.1 \pm 2.5	14.3 \pm 2.8	16.6 \pm 4.3

연안(24.1 \pm 23.5), 남해연안(18.8 \pm 8.9) 순으로 높았다. 계절적으로, 남해 11월 DIN/DIP 비 평균값(15.0 \pm 3.8)을 제외하고 모두 Redfield ratio보다 높아(Table 2), 세 해역의 제한영양염은 DIP인 것으로 나타났다. 선행 연구에 따르면, 서해연안의 N/P 비는 서해 북부에서 33.3(Lim *et al.*[2007]), 서해 중부에서 24.4(Lim *et al.*[2008])의 값으로 P가 잠재적 제한영양염으로 작용한다는 결과를 보고하였으며, 이는 본 연구의 결과와 일치한다. 남해연안에서 Lim *et al.*[2003]과 Jeong *et al.*[2013]은 N/P 비가 여름철 담수의 영향이 큰 일부 정점을 제외하면 Redfield ratio보다 낮아 일반적으로 남해연안에서는 N이 잠재적 제한영양염으로 작용한다고 보고하였으나, 모든 정점의 평균 N/P 비는 남해 중부에서 18.2(Lim *et al.*[2003]), 남해 동부에서 19.5(Jeong *et al.*[2013])으로 본 연구의 N/P 비와 값이 유사하였다. 이와 반대로, 동해연안의 DIN/DIP 비(24.1)는 이전 동해 연구에 비해 비슷하거나(동해 중부: 24; Lee *et al.*[2016]) 다소 높았다(동해 남부: 15.6; Won and Lee[2015]). 일반적으로 동해에서는 N이 제한영양염으로 작용하는 것으로 알려져 있고(Kim and Kim[2013]), Kwon *et al.*[2019]은 이러한 낮은 N/P 비의 원인을 동해연안이 비교적 육상, 외부 오염원에 의한 유입이 영향이 크지 않고, 주로 연안 용승과 외부 수괴 유입 등의 물리적 요인에 영향을 받는 것을 원인으로 제시하였다. 그러나, 본 연구의 동해연안 DIN/DIP는 24.1로 DIP가 제한 요소인 것으로 나타났다. 이 차이는 아마도 본 연구의 지역이 선행 연구 지역에 비해 육상과 아주 가까운 곳(<6 km)에 있어 육상으로부터 DIN 공급이 상대적으로 많았기 때문으로 생각된다. 또한, 주성분 분석 결과인 영양염과 염분 간 강한 양의 상관관계를 고려했을 때, 육상, 외부 오염원에 의한 영향으로 선행 연구와 N/P 비의 차이가 나타난 것으로 생각된다.

표층 DIN/DIP 비의 10년간 변동은 세 해역 모두 약한 감소 추세를 보였고, 몇몇 시기에는 아주 높은 비율이 관찰되었다(Fig. 9). 서해연안 표층수 DIN/DIP 비는 연간 1.5 감소하는 세 해역 중 가장 높은 감소 추세를 보였다(Fig. 9a). 서해연안의 표층 DIN 농도가 연간 0.80 μ M 감소하고, DIP 농도가 연간 0.005 μ M 증가하는 추세인 것을 고려하면(Fig. 2), DIN/DIP 비의 감소는 DIN 감소에 의한 영향이 컸을 것으로 판단된다. 남해연안 표층수 DIN/DIP 비는 연간 0.5 감소하는 추세로 세 해역 중 가장 낮았다(Fig. 9b). 표층 DIN 농도는 유의미한 변동이 나타나지 않았고, DIP가 연간 0.007 μ M 증가하는 추세가 나타난 것을 고려하면(Fig. 7), DIN/DIP 비의 감

소는 DIP 농도 증가에 의한 영향이 컸을 것으로 판단된다. 특징적으로, 남해연안에서 2011년, 2014년 여름철(8월)에 DIN/DIP 비는 각각 53.7, 46.5로 높았으며, 이는, 각각 DIN 농도 증가와 DIP 농도 감소, DIN 농도의 증가로 인해 나타났다. 해당 시기에 표층수 염분이 상대적으로 낮았던 점을 고려하면(Fig. 7), 담수를 통해 육상기원 영양염 특히, DIN이 유입되어 높은 값을 나타냈을 것으로 생각된다. 동해연안의 표층수 DIN/DIP 비는 연간 1.1 감소하는 추세를 보였다(Fig. 9c). 동해연안에서는 표층 DIN, DIP 농도의 유의미한 변동이 나타나지 않았기 때문에, 어떤 영양염에 의해 비율이 결정되었는지 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 특징적으로, 2014년 8월은 DIN 농도 상승으로 인해 DIN/DIP 비(132.8)는 가장 높았다. 이 시기는 가장 낮은 표층수 염분이 관찰된 시기로, 육상기원 DIN의 유입으로 높은 비율이 나타났을 것으로 생각된다. 2018년 5월과 2011년, 2016년 8월은 각각 50.8, 103.2, 43.6으로 DIN/DIP 비가 높았는데, 2018년 5월과 2011년 8월은 낮은 DIP 농도로, 2016년 8월은 높은 DIN 농도로 인해 높은 비율이 나타났다. 다만, 이 시기는 염분을 비롯한 다른 환경인자의 특징이 나타나지 않아 원인은 명확하지 않다.

해역별 저층수 DIN/DIP 비의 평균은 표층과 마찬가지로 서해연안(25.3 \pm 9.7), 동해연안(15.0 \pm 3.8), 남해연안(14.8 \pm 3.4) 순으로 높았다. 표층수의 제한영양염이 DIP로 나타난 것과 달리, 저층수는 서해연안에서만 DIP가 제한영양염으로 나타났으며, 남해의 2월과 5월, 동해의 11월을 제외하면 남해와 동해연안에서 DIN이 제한영양염으로 나타났다(Table 2). 이는, 남해와 동해연안은 서해연안에 비해 강을 통한 육상기원 물질 유입이 상대적으로 적고, 수직 혼합이 약하기 때문에, 이러한 차이가 발생한 것으로 생각된다. 즉, 두 해역 모두 저층에서 높은 산소 결핍과 상대적으로 높은 해수 성층을 고려하면(Figs. 7 and 8), 퇴적물에서 저층수로 DIP가 용출되어 DIN/DIP 비가 표층에 비해 낮았을 것으로 생각된다(Davidson *et al.*[2012]).

저층 DIN/DIP 비의 10년간 변동은 서해와 동해연안에서 약한 감소 추세를 보였고, 남해는 유효한 추세가 나타나지 않았다($p > 0.05$, Fig. 9). 서해연안 저층수 DIN/DIP 비 변동은 표층과 아주 유사하였으며, 이는 표층과 마찬가지로 저층에서 DIN 감소, DIP 증가에 따른 것으로 생각된다. 동해연안 저층수 DIN/DIP 비는 연간 0.4 감소하는 표층에 비해 약한 감소 추세가 나타났다. 저층 DIN 농도가

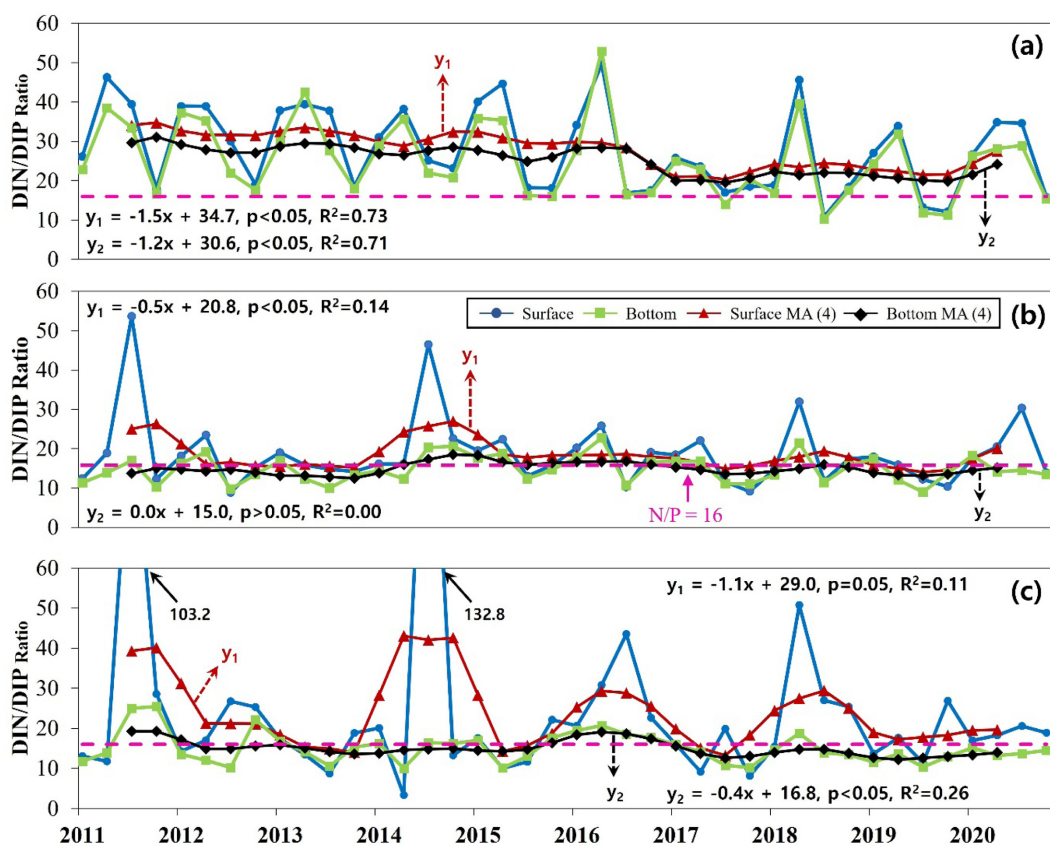


Fig. 9. Decadal changes (2011-2020) of monthly averages and moving averages (4) of the DIN/DIP ratio in surface and bottom waters from the (a) west, (b) south, and (c) east coasts of Korea (n=36). The linear equations y_1 and y_2 represent regressions in surface and bottom waters, respectively.

연간 $0.23 \mu\text{M}$ 증가하고, DIP 농도가 $0.026 \mu\text{M}$ 증가하는 추세인 것을 고려하면(Fig. 5), DIN/DIP 비의 감소는 DIP의 증가에 의한 영향이 컸을 것으로 판단된다.

한국 연안 해역에서 N/P 비가 감소하는 추세와는 다르게, 다른 지역 연안해역 N/P 비가 증가한다고 보고되었다. 예를 들어, Oelsner and Stets[2019]는 미국의 88개 연안 지역에서 1979년에 비해 2002-2012년 평균 N/P 비가 증가한 것을 N 농도 상승과 P 농도 감소, 또는 N 농도 감소와 P 농도 감소에 따른 것이라고 밝혔다. 또한, Doval *et al.*[2015]는 스페인 북부 갈리시안 연안의 두 정점에서 2002-2011년까지 표층 DIN 농도 증가, DIP 농도 감소와 함께 N/P 비의 증가를 보고하였다. Ye *et al.*[2020]은 동중국해 양쯔강 유역에서 1991-2015년까지 DIN, DIP 농도 증가와 함께 N/P 비가 증가하였다고 보고하였다. 또한, Xin *et al.*[2019]는 보하이해에서 1990년대부터 2010년 중반까지 급격한 DIN 농도 증가와 함께 N/P 비가 증가하였다고 보고하였다. 즉, 연안 지역은 농/공업 활동으로 질소의 연안 유입이 N/P 비의 급격한 증가 원인으로 알려져 있다. 이와는 반대로, 한국 연안은 N의 감소와 더불어 P의 증가가 N/P를 낮춘 것으로 판단된다. 즉, 강 유량 감소를 통한 N의 유입 감소와 해수 온도상승에 따른 성층 강화, 저층 재광물화 및 용출로 P의 유입이 늘었기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

한국 연안에서 2011-2020년까지 해수 중 용존영양염의 장기 변동을 살펴본 결과, 용존무기질소는 약한 감소 추세를 보인 반면, 용존무기인은 약한 증가 추세가 나타났다. 표층 DIN/DIP 비는 동해, 남해, 서해연안 모두 약한 감소 추세를 보였는데, N 감소와 더불어 P의 증가가 비율을 낮춘 것으로 나타났다. 일부 해역에서는 특정 시기에 유의미한 변동이 관찰되었다. 서해연안에서 8월은 DIN 농도가 표-저층에서 각각 연간 $2.71 \pm 0.45 \mu\text{M}$, $1.67 \pm 0.35 \mu\text{M}$ 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 육상으로부터 DIN의 공급 감소로 인한 것으로 판단된다. 남해연안 또한 2월 표-저층에서 연간 $0.34 \pm 0.12 \mu\text{M}$, $0.29 \pm 0.12 \mu\text{M}$ 증가했는데, 이는 양식장 활동 및 퇴적층 내 재광물화와 관련이 있을 것으로 판단된다. 주성분 분석을 통해 영양염 분포에 영향을 주는 요인을 파악한 결과, 대체적으로 육상기원 영양염의 유입뿐만 아니라 저층 퇴적물로부터 재광물화 및 용출 등 해수 내 생지화학적 과정에 영향을 받는 것으로 나타났다. 수질오염 총량관리제 도입, 정부 및 지자체의 수질 개선을 위한 노력으로 육상을 통한 용존무기질소 농도가 감소하는 경향이 나타났으나, 용존무기인은 퇴적층(저층)에서 나타나는 생지화학적 과정으로 농도가 약하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 가속화되고 있는 저층 빈

산소수위 등으로 향후 저층 및 퇴적층으로부터 영양염의 공급이 연안역 영양염 분포에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서, 연안 생태계의 변화 양상을 예측하기 위해서는 저층 환경에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP)(No. RS-2023-00301938) 및 중견연구(No. 2022R1A2C109112313) 사업 지원을 받아 수행된 연구임. 2022년도 부산대학교 미래지구환경연구소 기초과학 연구지원 사업비에 의하여 연구되었음(IFE-PNU-2022-001). 해양환경공단의 해양환경측정망 운영 자료를 활용하여 수행되었음.

References

- [1] Ali, S., Verma, S., Agarwal, M. B., Islam, R., Mehrotra, M., Deolia, R. K., Kumar, J., Singh, S., Mohammadi, A. A., Raj, D., Gupta, M. K., Dang, P. and Fattahi, M., 2024, Groundwater quality assessment using water quality index and principal component analysis in the Achnera block, Agra district, Uttar Pradesh, Northern India, *Sci. Rep.*, 14(1), 5381.
- [2] Argentino, C., Waghorn, K. A., Bünz, S. and Panieri, G., 2021, Sulfate reduction and anaerobic oxidation of methane in sediments of the South-Western Barents Sea, *Biogeosciences Discuss.*, 2021, 1-14.
- [3] Bates, B. C., 2008, *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 200.
- [4] Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Denis Gilbert, V. G., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., Telszewski, M., Yasuhara, M. and Zhang, J., 2018, Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Sci.*, 359(6371), eaam7240.
- [5] Chang, W. K., Ryu, J., Yi, Y., Lee, W. C., Lee, C. W., Kang, D., Lee, C. H., Hong, S., Nam, J. and Khim, J. S., 2012, Improved water quality in response to pollution control measures at Masan Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, 64(2), 427-435.
- [6] Chen, D., Shen, H., Hu, M., Wang, J., Zhang, Y. and Dahlgren, R. A., 2018, Legacy nutrient dynamics at the watershed scale: principles, modeling, and implications, *Adv. in agron.*, 149, 237-313.
- [7] Cheon, H. C., Nam, S. Y. and Kim, S. H., 2012, Effects of pH, temperature, and dissolved oxygen on phosphorus release from marine sediment to seawater, *J. of Navig. and Port Res.*, 36(6), 513-519.
- [8] Cho, K. J., Choi, M. Y., Kwak, S. K., Im, S. H., Kim, D. Y., Park, J. G. and Kim, Y. E., 1998, Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jinhae Bay, *The Sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 3(4), 193-202.
- [9] Correll, D. L., 1999, Phosphorus: a rate limiting nutrient in surface waters. *Poult. Sci.*, 78(5), 674-682.
- [10] Dai, M., Zhao, Y., Chai, F., Chen, M., Chen, N., Chen, Y., Cheng, D., Gan, J., Guan, D. and Zhang, Z., 2023, Persistent eutrophication and hypoxia in the coastal ocean, *Camb. Prism.: Coast, Futur.*, 2023, 1: e19.
- [11] Davidson, K., Gowen, R. J., Harrison, P. J., Fleming, L. E., Hoagland, P. and Moschonas, G., 2014, Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters, *J. of Environ. Manag.*, 146, 206-216.
- [12] Davidson, K., Gowen, R. J., Tett, P., Bresnan, E., Harrison, P. J., McKinney, A., Milligan, S., Mills, D. K., Silke, J. and Crooks, A. M., 2012, Harmful algal blooms: how strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence?, *Estuar., Coast. and Shelf Sci.*, 115, 399-413.
- [13] Doval, M. D., López, A. and Madriñán, M., 2016, Temporal variation and trends of inorganic nutrients in the coastal upwelling of the NW Spain (Atlantic Galician rías), *J. of Sea Res.*, 108, 19-29.
- [14] Field, A. P., 2000, *Discovering statistics using SPSS for Windows: Advanced techniques for beginners*, Sage Publ., Inc..
- [15] Heo, S. Y., 2013, *Analysis of slope behavior by moving average method*, Master Dissertation, Chonnam Nati. Univ., Gwangju, Korea.
- [16] Herbert, R. A., 1999, Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems, *FEMS microbiol. rev.*, 23(5), 563-590.
- [17] Hoagland, P. and Scatasta, S., 2006, The economic effects of harmful algal blooms, *Ecol. of harmful algae*, 391-402.
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (accessed 2024.08.24).
- [19] Jeong, D. H., Shin, H. H., Jung, S. W. and Lim, D. I., 2013, Variations and characters of water quality during flood and dry seasons in the eastern coast of South Sea, Korea, *Korean J. of Environ. Biol.*, 31(1), 19-36.
- [20] Jeong, H., Kang, S., Jung, H., Jeong, D., Oh, J., Choi, S., An, Y., Choo, H., Choi, S., Kim, S. and Cho, H. S., 2017, The Current status of eutrophication and suggestions of the purification & restoration on surface sediment in the northwestern Gamak bay, Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 105-113.
- [21] Jolliffe, I. T., 2002, Principal component analysis for special types of data. in: *Principal component analysis*. Springer series in statistics. Springer, New York, 338-372
- [22] Joung, D. and Shiller, A. M., 2016, Temporal and spatial variations of dissolved and colloidal trace elements in Louisiana Shelf waters, *Mar. Chem.*, 181, 25-43.
- [23] Kim, D. S., Lim, D. I., Jeon, S. K. and Jung, H. S., 2005, Chemical characteristics and eutrophication in Cheonsu Bay, west coast of Korea, *Ocean and Polar Res.*, 27(1), 45-58.
- [24] Kim, G., Choi, Y. and Kim, T. H., 2023, Distribution Characteristics of Organic Carbon and Nutrient in Effluent of Land-

- based Aquaculture Farms around Wando in Korea, *Ocean and Polar Res.*, 45(3), 103-111.
- [25] Kim, G., Lee, J. B., Agossou, A. and Yang, J. S., 2022, Proposal for the groundwater based countermeasures to secure water resources considering regional characteristics of water resources vulnerable areas, *J. of Korea Water Resour. Assoc.*, 55(3), 191-203.
- [26] Kim, H. G., 2007, Harmful red tide algal development and control, *Mag. of the Korean Soc. of Hazard Mitig.*, 7(3), 7-21.
- [27] Kim, J. G. and Kim, Y. S., 2002, Application of ecosystem model for eutrophication control, *J. Korean Fish. Soc.*, 35(4), 348-355.
- [28] Kim, T. H. and Kim, G., 2013, Changes in seawater N: P ratios in the northwestern Pacific Ocean in response to increasing atmospheric N deposition: Results from the East (Japan) Sea, *Limnol. and oceanogr.*, 58(6), 1907-1914.
- [29] Korean Statistical Information Service (KOSIS), Fish Farming Trends Research, <http://kosis.kr> (accessed 2024.06.20).
- [30] Kwon, K. Y., Shim, J. H. and Shim, J. M., 2019, Temporal variations of sea water environment and nutrients in the east coast of Korea in 2013~2017: Sokcho, Jukbyeon and Gampo coastal areas, *J. of the Korean Soc. of Mar. Environ. & Saf.*, 25(4), 457-467.
- [31] Lee, C. W., Kwon, Y. T., Boo, M. H., Kwon, H. B. and Yang, K. S., 2000, Eutrophication characteristics in the shellfish farms, the southern coastal sea of Korea, *J. of the Korean Soc. For Mar. Environ. & Energy.*, 3(3), 24-33.
- [32] Lee, J. E., Song, J. J. and Hong, S. G., 2006, Analysis of the water pollution circumstance in Hampyeong Coast, *J. of Korean Soc. of Environ. Technol.*, 7(3), 165-170.
- [33] Lee, J. S., Jung, R. H., Kim, S. S., Go, W. J., Kim, K. Y., Park, J. S. and Lee, Y. S., 2001, Limiting nutrient on phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *The Sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 6(3), 201-210.
- [34] Lee, T. S., 1999, Characteristics of nutrients distribution in summer and winter in the South Sea, *The Sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 4(4), 371-382.
- [35] Lee, Y. W., Park, M. O. and Kim, S. S., 2016, Spatiotemporal variations of marine environmental characteristics in the Middle East Coast of Korea in 2013-2014, *J. of the Korean Soc. for Mar. Environ. and Energy*, 19(4), 274-285.
- [36] Lee, Y. W., Park, M. O., Kim, S. G., Kim, T. H., Oh, Y. H., Lee, S. H. and Joung, D. J., 2024, Long-term variations of pH in coastal waters along the Korean Peninsula, *EGUsphere*, 2024, 1-22.
- [37] Li, H. M., Zhang, C. S., Han, X. R. and Shi, X. Y., 2015, Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980~2012: sources and seaward gradients, *Estuar, Coast. and Shelf Sci.*, 163, 44-55.
- [38] Li, M., Xu, K., Watanabe, M. and Chen, Z., 2007, Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem, *Estuar, Coast. and Shelf Sci.*, 71(1-2), 3-12.
- [39] Lim, D. I., Choi, H. W., Kim, Y. O., Jung, H. S. and Kang, Y. S., 2011, Concentration level and grading of water quality components (COD, DIN, DIP, Chlorophyll-a) in Korean coastal waters: A statistical approach, *Ocean and Polar Res.*, 33(1), 13-20.
- [40] Lim, D. I., Kang, M. R., Jang, P. G., Kim, S. Y., Jung, H. S., Kang, Y. S. and Kang, Y. S., 2008, Water quality characteristics along Mid-western coastal area of Korea, *Ocean and Polar Res.*, 30(4), 379-399.
- [41] Lim, D. I., Rho, K., C., Jang, P., G., Kang, S., M., Jung, H. S., Jung, R., H. and Lee, W., C., 2007, Temporal-spatial variations of water quality in Gyeonggi Bay, West Coast of Korea, and their controlling factor, *Ocean and Polar Res.*, 29(2), 135-153.
- [42] Lim, D. I., Um, I. K., Jeon, S. K., Yoo, J. M. and Jung, H. S., 2003, Physiochemical characteristics of coastal pseudo-estuarine environment formed during the summer flood season in the south coast of Korea, *The Sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 8(2), 151-163.
- [43] Meire, L. K. E. R., Soetaert, K. E. R. and Meysman, F. J. R., 2013, Impact of global change on coastal oxygen dynamics and risk of hypoxia, *Biogeosciences*, 10(4), 2633-2653.
- [44] Oelsner, G. P. and Stets, E. G., 2019, Recent trends in nutrient and sediment loading to coastal areas of the conterminous US: Insights and global context, *Sci. of the Total Environ.*, 654, 1225-1240.
- [45] Painting, S., Foden, J., Forster, R., van der Molen, J., Aldridge, J., Best, M., Jonas, P., Hydes, D., Walsham, P., Webster, L., Gubbins, M., Heath, M., McGovern, E., Vincent, C., Gowen, R. and O'Boyle, S., 2013, Impacts of climate change on nutrient enrichment, *Mar. Clim. Chang. Impacts Partnersh. Sci. Rev.*, Lowestoft, UK, 219-235.
- [46] Park, S., Kim, G., Kwon, H. K. and Han, I. S., 2023, Long-term changes in the concentrations of nutrients in the marginal seas (Yellow Sea, East China Sea, and East/Japan Sea) neighboring the Korean Peninsula, *Mar. Pollut. Bull.*, 192, 115012.
- [47] Rabalais, N. N., Cai, W. J., Carstensen, J., Conley, D. J., Fry, B., Hu, X., Quinones-Rivera, Z., Rosenberg, R., Psolom, C., Turner, R. E., Voss, M., Wissel, B. and Zhang, J., 2014, Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean, *Oceanogr.*, 27(1), 172-183.
- [48] Seitzinger, S. P. and Giblin, A. E., 1996, Estimating denitrification in North Atlantic continental shelf sediments, *Nitrogen cycl. in the N. Atl. Ocean and its watersheds*, 235-260.
- [49] Shimizu, Y., Onodera, S. I. and Saito, M., 2011, Effect of climate change on nutrient discharge in a coastal area, western Japan, *IAHS Publ.*, 348, 172-177.
- [50] Shin, C. W., 2019, Change of coastal upwelling index along the southeastern coast of Korea, *The sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 24(1), 79-91.
- [51] Shin, J. H., An, S. U., Choi, J. H., Lee, H. J., Woo, S. B., Hyun, J. H. and Kim, S. H., 2021, Rates and controls of organic matter

- mineralization and benthic nutrient release in the coastal sediment near lake Shihwa, *The sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 26(2), 110-123
- [52] Wang, J., Yu, Z., Wei, Q. and Yao, Q., 2019, Long-term nutrient variations in the Bohai Sea over the past 40 years, *J. of Geophys. Res.: Oceans*, 124(1), 703-722.
- [53] Won, J. H. and Lee, Y. W., 2015, Spatiotemporal variations of marine environmental parameters in the South-western region of the East Sea, *The sea : The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 20(1), 16-28.
- [54] Woo, H. J., Kim, H. Y., Jeong, K. S., Chun, J. H., Kim, S. E. and Chu, Y. S., 1999, Response of benthic foraminifera to sedimentary pollution in Masan Bay, Korea, *The sea : The J. of the Korean soc. of oceanogr.*, 4(2), 144-154.
- [55] World Meteorological Association., 2022, State of the global climate 2021.
- [56] Xin, M., Wang, B., Xie, L., Sun, X., Wei, Q., Liang, S. and Chen, K., 2019, Long-term changes in nutrient regimes and their ecological effects in the Bohai Sea, China, *Mar. Pollut. Bull.*, 146, 562-573.
- [57] Yang, J. S., Jeong, J. Y., Heo, J. Y., Lee, S. H. and Choi, J. Y., 1999, Chemical mass balance of materials in the Keum River Estuary: 1. Seasonal distribution of nutrients, *The Sea: The sea: The J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, 4(1), 71-79.
- [58] Ye, L. A., Zhang, H. B., Fei, Y. J., Liu, L. and Li, D. L., 2020, Nutrient distributions in the East China Sea and changes over the last 25 years, *Appl. Ecol. & Environ. Res.*, 18(1).
- [59] Yoo, S. and Park, J., 2009, Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan?, *J. of Mar. Syst.*, 78(2), 301-315.

Received 10 September 2024

1st Revised 7 November 2024, 2nd Revised 19 November 2024

Accepted 21 November 2024