

Article

동계와 춘계 진해만 표층수질에 대한 통계분석

김동선^{1*} · 최현우² · 김경희¹ · 정진현¹ · 백승호³ · 김영옥³

¹한국해양연구원 기후·연안재해연구부

²한국해양연구원 해양자료정보사업단
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³한국해양연구원 남해분원
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목1길 41

Statistical Analysis on the Quality of Surface Water in
Jinhae Bay during Winter and Spring

Dongseon Kim^{1*}, Hyun-Woo Choi², Kyung Hee Kim¹, Jin Hyun Jeong¹,
Seung Ho Baek³, and Yong-Ok Kim³

¹*Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI*

²*Ocean Data and Information Unit, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

³*South Sea Branch, KORDI
Geoje 656-830, Korea*

Abstract : To investigate major factors controlling variations in water quality, principal component analysis and cluster analysis were used to analyze data sets of 12 parameters measured at 23 sampling stations of Jinhae Bay during winter and spring. Principal component analysis extracted three major factors controlling variations of water quality during winter and spring. In winter, major factors included freshwater input, polluted material input, and biological activity. Whereas in spring they were polluted material input, freshwater input, and suspended material input. The most distinct difference in the controlling factors between winter and spring was that the freshwater input was more important than the polluted material input in winter, but the polluted material input was more important than the freshwater input in spring. Cluster analysis grouped 23 sampling stations into four clusters in winter and five clusters in spring respectively. In winter, the four clusters were A (station 5), B (stations 1, 2), C (station 4), and D (the remaining stations). In spring, the five clusters included A (station 5), B (station 1), C (station 3), D (station 6), and E (the remaining stations). Intensive management of the water quality of Masan and Hangam bays could improve the water quality of Jinhae Bay since the polluted materials were mainly introduced into Jinhae Bay through Masan and Hangam bays.

Key words : water quality, principal component analysis, cluster analysis, winter, spring, Jinhae Bay

1. 서 론

연안해역의 수질은 사람들의 건강과 해양생태계에 직접적인 영향을 미치기 때문에 지난 수 십년 동안 지대한 관심거리가 되어왔다. 인구가 증가하고 산업이 발전하면서 생활하수와 산업폐기물과 같은 오염물질들이 연안해역으로 유입되는 양이 점차 증가하고 있다. 최근 연안해역에서 양식장, 항만, 휴양지 개발과 같은 인간 활동이 증가하면서 수질은 더 악화되어가고 이에 따라 해양생태계도 점차 황폐화되어가고 있다. 따라서 연안 해역에서의 오염을 방지하고 수질을 유지하기 위해서는 현재 수질상태를 이해하고 수질의 시·공간변화를 파악하기 위한 수질 모니터링 프로그램이 필요하다(Dixon and Chriwell 1966; Singh et al. 2004). 미국과 유럽에서는 이미 오래전부터 다양한 수질 모니터링 프로그램을 개발하여 지속적으로 수질 모니터링을 수행하고 있다(Stambuk-Giljanovic 1999; Pesce and Wunderlin 2000; Giordani et al. 2009; Williams et al. 2009). 최근 연구자들이 연안해역 수질의 시·공간변화 특성을 파악하기 위해 주성분분석(principal component analysis), 군집분석(cluster analysis)과 같은 통계분석을 많이 이용하고 있다(Singh et al. 2004; Shrestha and Kazama 2007; Wu and Wang 2007; Zho et al. 2007; Wu et al. 2010). 주성분분석은 수질에 영향을 미치는 주요 요인들을 찾아내서 오염문제를 해결할 수 있는 수질관리 대책을 마련하는데 많이 이용된다(Shrestha and Kazama 2007). 또한, 군집분석은 비슷한 특성을 지닌 그룹들을 하나의 군집으로 묶어서 복잡한 공간변화를 단순화시키는데 주로 이용된다(Wu and Wang 2007).

마산만은 창원시(구 마산시, 창원시, 진해시)로 둘러 쌓여있고 수 천개의 산업공장이 있는 자유무역단지가 마산만 주위에 존재하고 있다. 1960년대 이후, 매일 97,990톤의 생활하수와 76,130톤의 산업폐수가 아무런 처리도 받지 않고 한천을 통해 마산만으로 유입되고 있다(Lee and Min 1990). 따라서 마산만은 우리나라에서 오염이 가장 심한 해역으로 알려져 있다; 매년 여름이면 적조가 발생하여 물고기들이 폐사하고 저층에서는 산소농도가 2 mg l^{-1} 이하의 저산소 상태가 발생하여 저서생물이 서식할 수 없는 환경이 된다(Lim et al. 2006; Lee and Kim 2008). 마산만 오염을 방지하고 수질을 개선하기 위해서 하루에 280,000톤의 하수를 처리할 수 있는 규모의 마산 하수종말처리장이 1993년에 건설되었고 2003년에는 하수처리능력이 500,000톤으로 증가하였다(Jang et al. 2011). 또한, 하루에 60,000톤의 하수를 처리할 수 있는 규모의 진해 하수종말처리장이 2001년에 건설되었다. 하지만 마산만 수질은 하수종말처리장이 건설된 이후도 크게 개선되지 않고 주변 해역에 비해 상대적으로 악화되어 있다(임 등

2007; Jang et al. 2011). 지금까지는 진해만에서 수질연구는 오염이 심한 마산만을 중심으로 상당히 많이 수행되었다(Lee and Min 1990; 이 등 1996; 조와 채 1998; 조와 채 1999; 강 등 2000; 조 등 2000; 조 등 2002; 조 등 2004; Lim et al. 2006; 임 등 2007; Lee and Kim 2008; Jang et al. 2011). 이들 연구들은 주로 마산만 오염부하량 특성 파악, 마산만 준설사업과 하수종말처리장 건설에 따른 수질변화, 진해만에서 장기 모니터링을 통한 수질변화 등에 집중되었다. 하지만 진해만에서 주성분분석이나 군집분석과 같은 통계분석을 통한 수질연구는 아직까지 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 겨울과 봄에 진해만 표층해수에서 얻은 수질자료에 대하여 주성분분석과 군집분석을 수행하여 진해만에서 수질에 영향을 미치는 주요 요인들을 파악하고 해역별 분포 특성을 파악하고자 한다.

2. 연구 방법

시료채집 및 분석방법

겨울 조사는 2010년 2월 8일과 9일 이틀 동안 수행되었고 봄 조사는 2010년 5월 5일과 6일 이틀 동안 수행되었다. 연구 해역은 진해만 전체해역으로 총 조사점점은 23 개이고 마산만에 4개, 행암만에 2개, 진동만에 3개, 고현만에 3개 정점이 포함되어 있다(Fig. 1). 각 조사정점에서 니스킨(Niskin) 채수기를 이용하여 표층해수를 채집하였다. 수온과 염분은 다항목 수질측정기(Water Quality Sondes; Hydrolab MS5)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

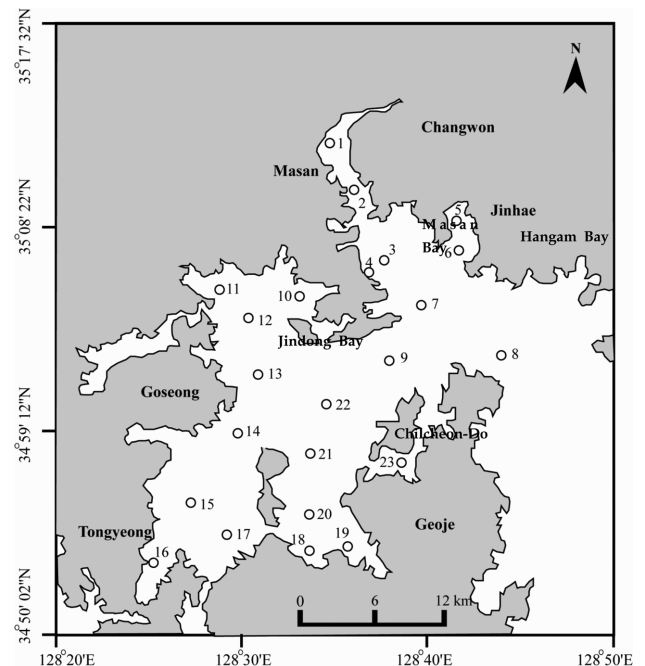


Fig. 1. Study area and sampling stations in Jinhae Bay

해수 1000 ml를 0.7 μm Whatman GF/F 여과지로 거른 후, 여과된 해수는 영양염과 용존유기탄소 분석을 위해 두 개로 나누었으며, 영양염 분석용 해수는 HgCl_2 를 넣어 냉장보관하였고 용존유기탄소 분석용 해수는 냉동보관하였다. GF/F 여과지는 부유물질, 엽록소, 입자태유기탄소 분석을 위해 냉동하였다. 영양염 분석은 시료를 실험실로 운반하여 5일 이내에 수행하였다. 용존산소는 현장에서 manganese chloride와 alkaline-iodide 용액을 시료병에 넣어 고정한 후에 실험실로 운반하여 3일 이내에 Winkler 역적정법(back-titration)을 이용하여 측정하였다.

암모니아, 질산염+아질산염(이후로 질산염이라 줄여서 명함), 인산염, 규산염 농도는 자동이온분석기(Proxima, Alliance)를 이용하여 측정하였으며, 각각의 측정값은 표준 해수시료(SRM)를 이용하여 검증하였다. 두 번 이상 분석을 통하여 얻은 질산염, 인산염, 규산염의 정밀도는 5% 이내였다. 엽록소 농도는 90% 아세톤 10 ml로 24시간 동안 추출한 후에 Turner-designed fluorometer(Turner BioSystems, USA)를 이용하여 측정하였다. 입자태유기탄소(particulate organic carbon) 농도는 GF/F 여과지(사용 전에 550°C에서 5시간 태움)를 염산 원액이 들어있는 데 시케이터에 24시간 동안 넣어 무기탄소(inorganic carbon)를 제거한 후에, CNS 분석기(EA1110, CE Instrument)를 이용하여 분석하였다. 용존유기탄소(dissolved organic carbon) 농도는 지오시스템서치(주)에서 HTCO(high-temperature catalytic oxidation)/NDIR(non-dispersive infrared gas analysis)의 방법으로 총유기탄소분석기(TOC-5000A, SHIMADZU)를 이용하여 측정하였다. pH는 30 ml 해수에 0.01 ml m-cresol purple를 넣어 발색한 후에, 분광분석기(spectrophotometer)를 이용하여 측정하였다(Dickson et al. 2007).

통계분석

진해만의 수질자료에 대한 주성분분석을 수행하기 전 각 수질항목의 단위와 값의 차원(order)이 상이하여 평균과 표준편차를 이용한 표준화를 각각 수행하였다. 주성분분석 시 요인 수는 하나의 요인이 변수 한 개 이상의 분산을 설명할 수 있는 고유치(eigenvalue)가 1 이상을 기준으로 결정하고, 각 요인에 해당되는 변수를 설명하는 요인부하량(loading factor)를 각각 산출하였다. 또한, 변수와 요인과의 관계를 명확히 파악하기 위해 직각회전 방식 중 하나인 Varimax 회전법을 적용하였다. 군집분석은 가까운 개체들끼리 묶어감으로써 군집을 만드는 병합적 방법에 의한 계층적군집화(Agglomerative Hierarchical Clustering) 방법을 사용하여 수행하였다. 군집화를 위한 비유사도(dissimilarity)는 유클리디안 거리(Euclidean distance) 척도를 이용하였고, 병합적 방법으로는 평균연결법인

unweighted pair-group average linkage를 사용하였다. 주성분분석과 군집분석을 위한 제반 통계처리는 XLSTAT 2010(AddinSoft™) 프로그램을 이용하였다.

3. 결 과

겨울철 표층수질의 공간분포

암모니아는 마산만에서 12 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이상의 매우 높은 농도를 나타냈고 마산만 앞에 위치한 정점 7에서도 12.1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 높은 농도를 보였으며, 그 외 해역에서는 3.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이하의 비교적 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 2). 질산염은 행암만 안쪽정점(정점 5)에서만 15.3 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 다른 해역에서는 2.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이하의 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 2). 암모니아, 질산염, 아질산염을 합한 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen)는 암모니아와 매우 유사한 분포형태를 나타냈다. 인산염은 하수종말처리장에 인접한 정점(정점 4)에서 1.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 행암만 안쪽정점(정점 5)에도 0.77 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 높은 농도를 나타냈으며, 다른 해역에서는 0.11~0.37 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 농도범위로 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 규산염은 행암만 안쪽정점에서 16.7 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 고성 인근 정점(정점 14)에서 9.4 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 높은 농도를 나타냈으며, 다른 해역에서는 2.9~7.5 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 농도범위로 인산염과 마찬가지로 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).

엽록소는 마산만 입구정점(정점 3)에서 8.3 $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 최고 농도를 나타냈으며, 용존무기질소와 유사한 분포를 나타냈다(Fig. 2). 입자태유기탄소는 마산만 안쪽정점(정점 1)에서 0.62 mg l^{-1} 의 최고 농도를 보였고 마산만과 행암만에서 0.40 mg l^{-1} 이상의 높은 농도를 나타낸 반면, 다른 해역에서는 0.20 mg l^{-1} 내외의 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 2). 용존유기탄소는 행암만 안쪽정점에서 1.6 mg l^{-1} 의 최고 농도를 보였고 다른 해역에서는 0.88~1.2 mg l^{-1} 의 농도범위로 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 입자태유기탄소와 용존유기탄소를 합한 총유기탄소(total organic carbon)는 마산만, 행암만, 고현만에서 1.4 mg l^{-1} 이상의 높은 농도를 나타냈다. 부유물질은 행암만 안쪽정점(정점 5)에서 23.8 mg l^{-1} 의 매우 높은 농도를 나타냈고 다른 해역에서는 2.0~7.5 mg l^{-1} 의 농도범위로 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 용존산소는 행암만 바깥정점(정점 6)에서 12.2 mg l^{-1} 의 최고 농도를 보였고 마산만 안쪽정점(정점 1)에서 10.3 mg l^{-1} 의 최저 농도를 나타냈으며, 해역에 따라 특별한 차이를 보이지 않았다. pH는 8.15~8.33의 범위를 나타냈으며, 해역에 따라 특별한 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).

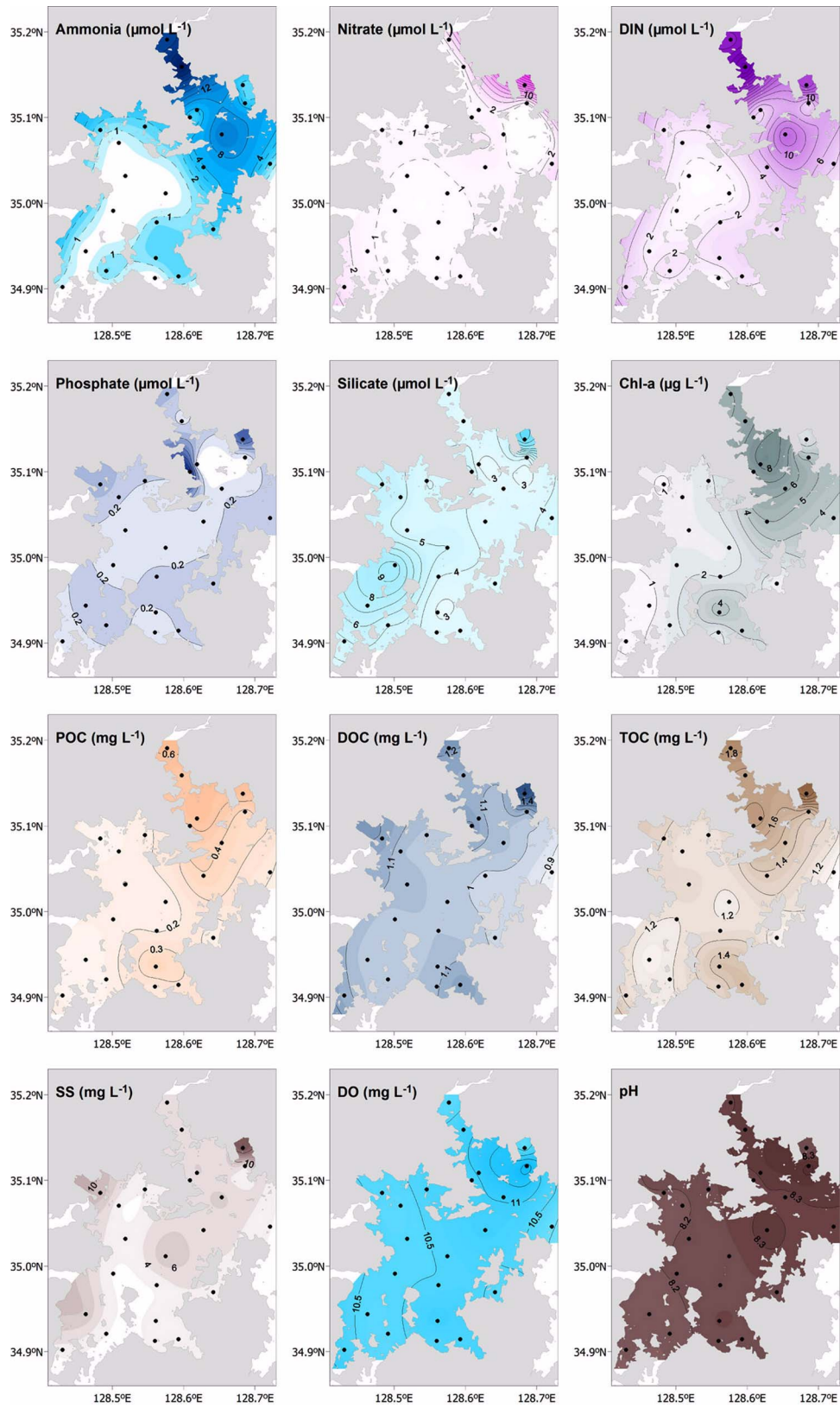


Fig. 2. Surface distribution of ammonia, nitrate, phosphate, silicate, chlorophyll-a (Chl-a), particulate organic carbon (POC), dissolved organic carbon (DOC), total organic carbon (TOC), suspended solid (SS), dissolved oxygen (DO), and pH in the surface waters of Jinhae Bay during winter

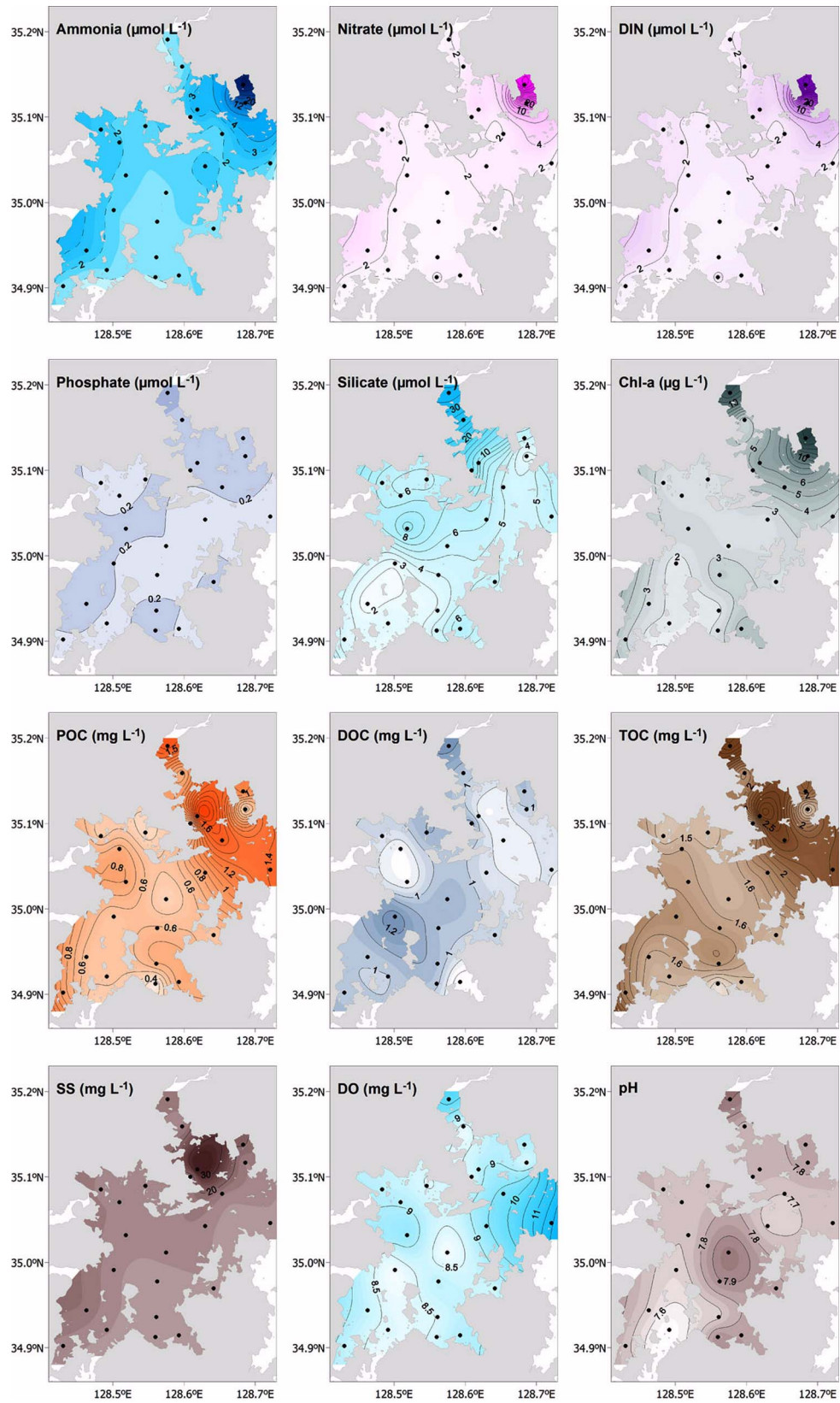


Fig. 3. Surface distribution of ammonia, nitrate, phosphate, silicate, chlorophyll-*a* (Chl-*a*), particulate organic carbon (POC), dissolved organic carbon (DOC), total organic carbon (TOC), suspended solid (SS), dissolved oxygen (DO), and pH in the surface waters of Jinhae Bay during spring

봄철 표층수질의 공간분포

암모니아는 행암만 안쪽정점(정점 5)에서 $32.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 행암만 바깥정점(정점 6)에서도 $15.7 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 높은 농도를 나타냈으며, 그 밖에 다른 해역에서는 $1.1\sim 3.7 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 농도범위를 나타내 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 질산염도 암모니아와 유사한 분포를 보여, 행암만 안쪽정점(정점 5)에서 $8.2 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 다른 해역에서는 $1.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이하의 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 3). 용존무기질소도 암모니아와 질산염과 매우 유사한 분포형태를 나타내, 행암만 안쪽정점에서 $40.2 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 나타냈고 그 밖에 다른 해역에서는 $2.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ 내외의 낮은 농도를 보였다. 인산염은 진해만 전체해역에서 $0.17\sim 0.37 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 농도범위를 나타냈으며 해역에 따라 뚜렷한 변화를 보이지 않았다(Fig. 3). 규산염은 마산만 안쪽정점(정점 1)에서 $33.4 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 마산만 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 농도가 점차 감소하였으며, 마산만 이외의 해역에서는 $2.4\sim 9.2 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 농도범위로 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3).

엽록소는 행암만 안쪽정점(정점 5)에서 $15.0 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 최고 농도를 보였고 마산만 안쪽정점(정점 1)에서 $12.9 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 높은 농도를 나타냈으며, 그 외의 해역에서는 $1.7\sim 6.1 \mu\text{g l}^{-1}$ 의 농도범위를 보였다(Fig. 3). 입자태유기탄소는 엽록소와 유사한 분포를 보여, 마산만과 행암만에서 1.0mg l^{-1} 이상의 높은 농도를 보였고 그 외의 다른해역에서는 1.0mg l^{-1} 이하의 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 3). 용존유기탄소는 행암만 안쪽정점과 고성 인근정점(정점 14)에서 1.2mg l^{-1} 의 최고 농도를 보였고 다른 해역에서는 $0.72\sim 1.1 \text{mg l}^{-1}$ 의 농도범위로, 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3-2-4). 총유기탄소는 전반적으로 입자태유기탄소와 유사한 분포를 보였다(Fig. 3). 부유물질은 마산만 입구정점(정점 3)에서 38.0mg l^{-1} 의 최고 농도를 나타냈고 다른 해역에서는 $12.8\sim 20.2 \text{mg l}^{-1}$ 의 농도범위로 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 용존산소는 행암만 바깥정점(정점 6)에서 11.8mg l^{-1} 의 최고 농도를 보였고 정점 8에서 8.2mg l^{-1} 의 최저농도를 나타냈으며, 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. pH는 마산만 안쪽정점(정점 1)에서 8.00으로 최고 값을 나타냈고 정점 17에서 7.52로 최소 값을 보였으며, 해역에 따라 특별한 차이를 보이지 않았다(Fig. 3).

주성분분석

겨울과 봄 동안 진해만 표층해수 수질에 대한 주성분분석 결과를 Table 1과 2에 나타냈다. 겨울철 진해만 표층해수에서 제1 주성분은 전체 변동(variance)의 38.2%를 차지하며, 질산염, 부유물질, 규산염, 용존유기탄소, 총유기

Table 1. Loadings of environmental variables on the first three Varimax rotated principal components for the water quality data collected in the surface waters of Jinhae Bay during winter (loadings >0.6 are bolded)

Variable	Component		
	1	2	3
PO ₄	0.61	0.08	0.03
NH ₄	-0.10	0.94	0.01
Si	0.89	-0.19	-0.18
NO ₃	0.95	0.08	0.06
DIN	0.29	0.89	0.03
Chl _a	-0.06	0.65	0.66
DO	-0.16	0.08	0.79
DOC	0.86	0.32	0.01
POC	0.37	0.72	0.52
TOC	0.66	0.62	0.34
SS	0.91	0.10	0.04
Temp.	0.36	-0.25	0.65
pH	-0.17	0.41	0.84
Sal.	-0.93	-0.08	0.13
Eigenvalue	5.35	3.40	2.64
% of variance	38.22	24.26	18.85
Cumulative %	38.22	62.48	81.33

Table 2. Loadings of environmental variables on the first three Varimax rotated principal components for the water quality data collected in the surface waters of Jinhae Bay during spring (loadings >0.6 are bolded)

Variable	Component		
	1	2	3
PO ₄	0.13	0.78	0.27
NH ₄	0.96	0.00	0.21
Si	-0.20	0.87	0.24
NO ₃	0.93	0.12	0.10
DIN	0.97	0.03	0.19
Chl _a	0.70	0.53	0.41
DO	0.52	0.32	0.38
DOC	-0.37	0.46	-0.32
POC	0.37	0.36	0.84
TOC	0.27	0.50	0.76
SS	0.01	-0.08	0.90
Temp.	0.38	0.12	0.68
pH	0.18	0.67	-0.05
Sal.	-0.27	-0.83	-0.17
Eigenvalue	4.12	3.51	3.22
% of variance	29.44	25.05	22.99
Cumulative %	29.44	54.49	77.48

Table 3. Pearson's correlation coefficient matrix of environmental parameters in the surface waters of Jinhae Bay during winter

	PO ₄	NH ₄	Si	NO ₃	DIN	Chla	DO	DOC	POC	TOC	SS	Temp.	pH	Sal.
PO ₄	1.000													
NH ₄	-0.043	1.000												
Si	0.458*	-0.221	1.000											
NO ₃	0.469*	0.018	0.830**	1.000										
DIN	0.148	0.917**	0.130	0.414*	1.000									
Chla	0.190	0.554**	-0.316	-0.010	0.500*	1.000								
DO	-0.227	0.088	-0.279	-0.142	0.024	0.494*	1.000							
DOC	0.548**	0.150	0.648**	0.798**	0.454*	0.146	0.034	1.000						
POC	0.343	0.581**	0.065	0.423*	0.698**	0.858**	0.342	0.554**	1.000					
TOC	0.491*	0.442*	0.365	0.667**	0.668**	0.616**	0.233	0.850**	0.909**	1.000				
SS	0.422*	0.031	0.793**	0.877**	0.378	0.007	-0.053	0.783**	0.376	0.629**	1.000			
Temperature	0.213	-0.120	0.251	0.453*	0.071	0.213	0.204	0.070	0.252	0.195	0.290	1.000		
pH	-0.074	0.430*	-0.333	-0.060	0.367	0.775**	0.714**	-0.025	0.641**	0.393	-0.033	0.378	1.000	
Salinity	-0.474*	0.020	-0.813**	-0.872**	-0.329	0.129	0.158	-0.845**	-0.326	-0.628**	-0.850**	-0.184	0.257	1.000

*p-value <0.05, **p-value <0.01

Table 4. Pearson's correlation coefficient matrix of environmental parameters in the surface waters of Jinhae Bay during spring

	PO ₄	NH ₄	Si	NO ₃	DIN	Chla	DO	DOC	POC	TOC	SS	Temp.	pH	Sal.
PO ₄	1.000													
NH ₄	0.166	1.000												
Si	0.628**	-0.129	1.000											
NO ₃	0.227	0.939**	0.011	1.000										
DIN	0.180	0.998**	-0.102	0.961**	1.000									
Chla	0.611**	0.758**	0.389	0.726**	0.759**	1.000								
DO	0.546**	0.531**	0.135	0.341	0.498*	0.738**	1.000							
DOC	0.186	-0.321	0.342	-0.242	-0.309	-0.101	-0.282	1.000						
POC	0.530**	0.530**	0.414*	0.453*	0.520*	0.810**	0.649**	-0.207	1.000					
TOC	0.593**	0.449*	0.519*	0.393	0.442*	0.797**	0.582**	0.073	0.960**	1.000				
SS	0.181	0.225	0.131	0.162	0.215	0.333	0.162	-0.282	0.721**	0.655**	1.000			
Temperature	0.264	0.495*	0.282	0.438*	0.488*	0.527*	0.403	-0.334	0.680**	0.598**	0.466*	1.000		
pH	0.479*	0.118	0.426*	0.172	0.130	0.465*	0.327	-0.030	0.281	0.278	0.024	0.014	1.000	
Salinity	-0.607**	-0.297	-0.826**	-0.420*	-0.325	-0.656**	-0.316	-0.128	-0.508*	-0.554**	-0.086	-0.462*	-0.554**	1.000

*p-value <0.05, **p-value <0.01

탄소, 인산염 등이 높은 양(positive)의 요인부하량(positive loading factor)을 보였고 염분은 높은 음(negative)의 요인부하량(negative loading factor)을 나타냈다(Table 1). 제2 주성분은 전체 변동의 24.3%를 차지하며, 암모니아, 용존 무기질소 입자태유기탄소, 총유기탄소 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다. 제3 주성분은 전체 변동의 18.9%를 차지하며, pH, 용존산소, 엽록소, 수온 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다.

봄철 진해만 표층해수에서 제1 주성분은 전체 변동(variance)의 29.4%를 차지하며, 용존무기질소, 암모니아, 질산염, 엽록소 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다(Table 2). 제2 주성분은 전체 변동의 25.1%를 차지하며, 규산염, 인산염, pH 등이 높은 양의 요인부하량을 보였고 염분은 높은 음의 요인부하량을 보였다. 제3 주성분은 전체 변동의 23.0%를 차지하며, 부유물질, 입자태유기탄소, 총유기탄소, 수온 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다.

군집분석

조사정점 사이의 유사성을 찾아 그룹을 만들기 위해 군집분석을 실시하여 비유사도를 표시한 덴드로그램(dendrogram)을 Fig. 4에 나타냈다. 덴드로그램에서 비유사도를 5 이하로 하여 조사정점들을 군집으로 나누었다. 겨울에 진해만에서 조사된 23개의 정점은 4개의 군집으로 분류된다. A 군집에는 정점 5, B 군집에는 정점 1과 2, C 군집에는 정점 4, D 군집에는 그 외 나머지 정점들이 포함된다(Fig. 4a). 봄에 진해만에서 조사된 23개의 정점은 5개의 군집으로 분류된다. A 군집에는 정점 5, B 군집에는 정점 1, C 군집에는 정점 3, D 군집에는 정점 6, E 군집에는 그 외 나머지 정점들이 포함된다(Fig. 4b).

4. 토 의

진해만 수질에 영향을 미치는 주요 요인

겨울철 진해만 표층해수에서 주성분 분석을 한 결과, 제1 주성분에는 질산염, 부유물질, 규산염, 용존유기탄소, 총유기탄소, 인산염 등이 높은 양의 요인부하량을 보였고 염분은 높은 음의 요인부하량을 나타냈다(Table 1). 일반적으로 질산염, 인산염, 규산염, 부유물질 등은 주로 강이나 하천을 통해 해양으로 유입되는 것으로 알려져 있다. 따라서 제1 주성분이 질산염, 규산염, 인산염과 높은 양의 상관관계를 나타냈고 염분과 높은 음의 상관관계를 보인 것으로 보아 담수 유입의 영향인 것으로 판단된다. 염분이 높은 음의 요인부하량을 받은 것은 하천을 통해 담수가 진해만 표층해수로 많이 유입될수록 염분은 감소하기 때문이다. 제1 주성분에 총유기탄소와 용존유기탄소가 높은 상관관계를 보인 것은 겨울철 진해만 표층해수에서 총유기탄소는 수층에서 생물생산에 의해 생성되기 보다는 하천을 통해 표층해수로 유입되는 것을 지시해준다. 제2 주성분에는 암모니아, 용존무기질소 입자태유기탄소 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다(Table 1). 제2 주성분은 암모니아와 높은 상관관계를 보인 것으로 보아 오염물질 유입에 의한 영향으로 판단된다. 일반적으로 암모니아가 생활하수나 공장폐수에 많이 포함되었기 때문에 오염물질 유입을 지시해준다(Wu and Wang 2007). 입자태유기탄소가 제2 주성분에서 높은 양의 요인부하량을 보인 것으로 보아, 겨울철 진해만 표층해수에서는 입자태유기탄소가 생물생산력에 의해 생성된 것보다 생활하수와 같은 오염물질에 포함되어 더 많이 유입된 것으로 생각된다. 제3 주성분에는 pH, 용존산소, 엽록소, 수온 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다(Table 1). 제3 주성분이 용존산소, 엽록소와 높은 양의 상관관계를 보인 것으로 보아 생물활동에 의한 영향인 것으로 생각된다. 엽록소는 식물플랑크톤 생물량을 대표하기 때문에 생물활동과 직접적인 관계가 있고 용존산

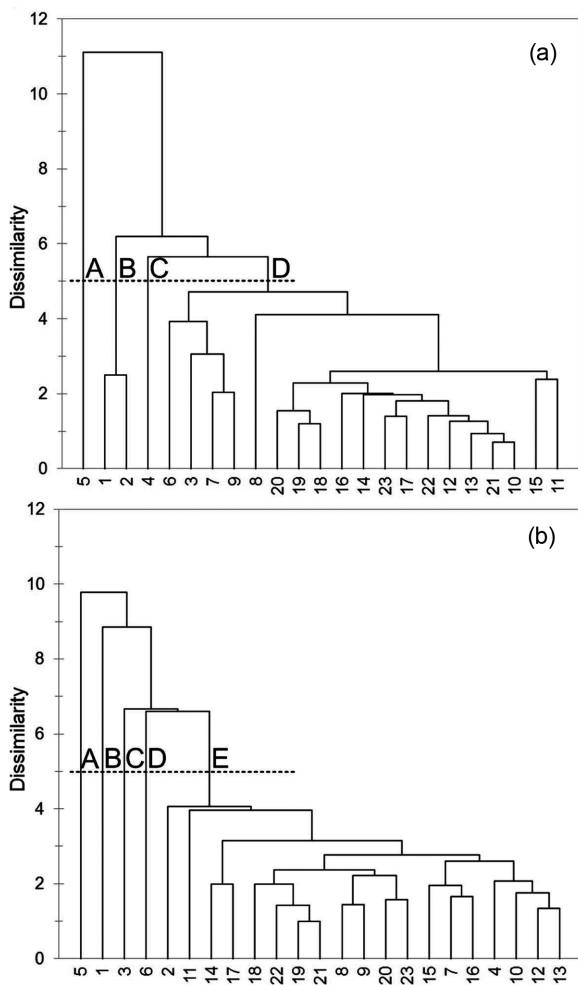


Fig. 4. Dendrograms showing clustering of the sampling stations in Jinhae Bay during (a) winter and (b) spring, using group average linkage method

소는 광합성에 의해 생성되기 때문에 생물활동을 지시해 준다. 특이한 사항은 총유기탄소와 용존유기탄소 생물활동에 의한 영향을 크게 받지 않은 것이다. 일반적으로 해양에서 총유기탄소는 주로 생물활동에 의해 영향을 받는데, 겨울철 진해만 표층해수에서는 유기탄소가 생물활동보다는 하천을 통해 더 많이 유입되는 것으로 판단된다.

봄철 진해만 표층해수에서는 제1 주성분에는 용존무기질소, 암모니아, 질산염, 엽록소 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다(Table 2). 제1 주성분이 암모니아와 높은 양의 상관관계를 보인 것으로 보아 오염물질 유입의 영향인 것으로 판단된다. 일반적으로 질산염은 강이나 하천을 통해 해양으로 유입되는데, 봄철 진해만에서는 질산염이 오염물질 유입과 밀접한 관계를 보였다. 이것은 아마도 오염물질에 많이 포함되어 있는 암모니아가 산화되어 질산염으로 전환되었기 때문인 것으로 생각된다. 엽록소도 오염물질과 밀접한 상관관계를 보였는데, 이것은 오염물질에 의해 용존무기질소 농도가 증가하여 식물플랑크톤 성장이 증가하였기 때문이다. 제2 주성분에는 규산염, 인산염, pH 등이 높은 양의 요인부하량을, 염분은 높은 음의 요인부하량을 보였다(Table 2). 제2 주성분이 규산염, 인산염과 높은 양의 상관관계를 나타냈고 염분과 높은 음의 상관관계를 보인 것으로 보아 담수 유입에 의한 영향인 것으로 생각된다. 일반적으로 규산염, 인산염, 염분 등은 담수유입과 밀접한 관계를 보이지만 pH는 예상외로 담수유입과 높은 상관관계를 나타냈다. 또한, pH는 담수(6~7)보다 해수(8)에서 높기 때문에 담수유입과 pH는 음의 상관관계를 보여야 하지만 봄철 진해만에서는 양의 상관관계를 나타냈다. 본 연구에서는 봄철에 pH가 담수유입과 높은 양의 상관관계를 보이는 이유는 정확히 파악하기 어려워, pH에 직접적인 영향을 미치는 용존무기탄소와 알칼리도(alkalinity)에 대한 추가 연구가 필요하다. 제3 주성분에는 부유물질, 입자태유기탄소, 총유기탄소, 수온 등이 높은 양의 요인부하량을 보였다(Table 2). 제3 주성분이 부유물질, 입자태유기탄소와 높은 양의 상관관계를 보인 것으로 보아 부유물질의 영향으로 판단된다. 일반적으로 부유물질은 강이나 하천을 통해 해양으로 유입되기 때문에 담수유입과 밀접한 관계를 보이는데, 봄철 진해만에서 담수유입과 매우 낮은 상관관계를 나타냈다. 또한 부유물질은 제1 주성분인 오염물질 유입과도 낮은 상관관계를 보여, 식물플랑크톤 생물량 증가에 의한 영향도 거의 받지 않는 것으로 판단된다. 따라서 봄에는 진해만 표층해수에서 부유물질은 주로 저층 퇴적물의 재부유(resuspension)에 의해 크게 영향을 받는 것으로 판단된다.

겨울철 진해만 표층해수의 수질은 담수 유입에 의한 영향(38.2%)을 가장 많이 받았고 그 다음으로 오염물질 유입에 의한 영향(24.3%)이고 마지막으로 생물생산력에 의

한 영향(18.9%)을 받았다. 겨울철과 달리, 봄철 진해만 표층해수의 수질은 오염물질 유입에 의한 영향(29.4%)을 가장 많이 받았고 그 다음으로 담수 유입에 의한 영향(25.1%)을 받았고 마지막으로 부유물질의 영향(23.0%)을 받았다. 따라서 진해만 표층해수 수질에 영향을 미치는 요인들이 계절에 따라 큰 차이를 보였다. 가장 특징적인 차이는 겨울에는 오염물질의 유입에 의한 영향보다 담수 유입에 의한 영향을 더 많이 받았지만, 봄에는 반대로 담수 유입에 의한 영향보다 오염물질의 유입에 의한 영향을 더 많이 받은 것이다. 따라서 진해만에서는 겨울에 비해 봄에 오염물질 유입에 의한 영향을 더 많이 받기 때문에 겨울보다 봄에 더 집중적으로 오염물질 유입을 관리해야 할 것으로 생각된다.

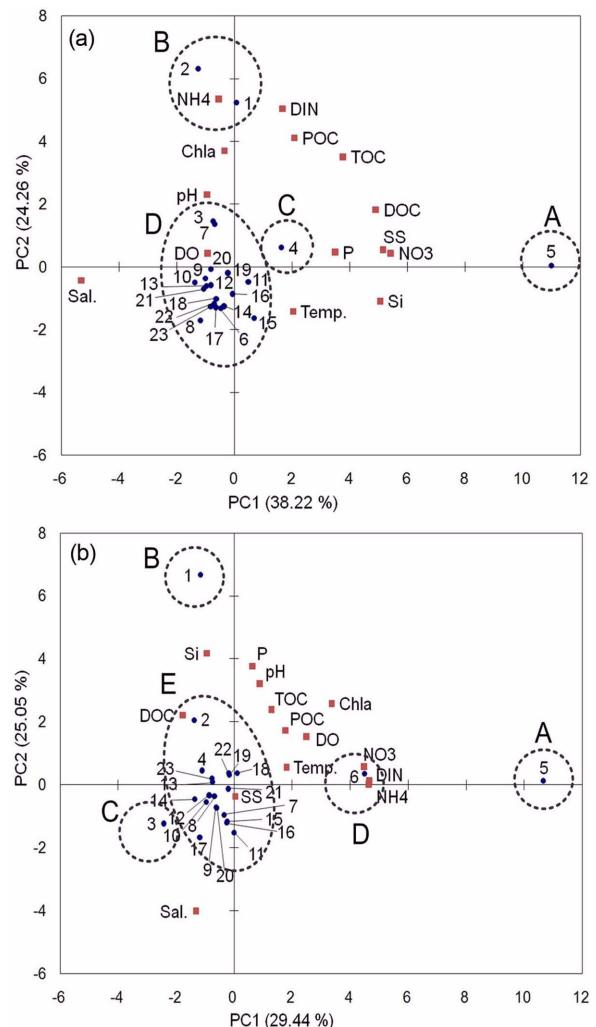


Fig. 5. The loading factors of variables and factor scores of 23 sampling stations for the first two principal components after Varimax rotation during (a) winter and (b) spring. The number denotes the station number, and the rectangle indicates the variable

진해만 수질의 해역별 분포 특성

겨울철 진해만 표층해수는 4개의 군집으로 나누어진다 (Fig. 4a); A 군집(정점 5), B 군집(정점 1, 2), C 군집(정점 4), D 군집(나머지 정점). 군집분석을 통해 나누어진 4개의 군집을 제1 주성분과 제2 주성분에 대하여 도시하였다(Fig. 5a). A 군집은 질산염, 인산염, 부유물질, 용존유기탄소 등과 높은 상관관계를 갖는 제1 주성분에서 높은 요인부하량을 보이는 것으로 보아, 주로 담수 유입에 의한 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 겨울철 정점 5에서 표층해수에서 질산염, 규산염, 부유물질, 인산염, 용존유기탄소 농도가 다른 정점들에 비해 특별히 높은 것은 담수 유입이 많았기 때문이다. B 군집은 암모니아, 용존무기질소, 입자태유기탄소, 엽록소 등과 높은 상관관계를 갖는 제2 주성분에서 높은 요인부하량을 보이는 것으로 보아, 주로 오염물질 유입에 의한 영향을 받는 것으로 생각된다. 마산만 안쪽정점인 정점 1과 2에서 겨울철 표층해수에서 암모니아, 용존무기질소, 엽록소, 입자태유기탄소 농도가 높은 것은 생활하수와 공장폐수에 의한 오염물질 유입이 많았기 때문이다. C 군집은 제1 주성분과 제2 주성분 모두와 약간의 상관관계를 보이는 것으로 보아, 담수와 오염물질 유입 모두에 의해 약간씩 영향을 받는 것으로 판단된다. C 군집에 속한 정점 4는 위치상에서도 A 군집에 속한 정점 5와 B 군집에 속한 정점 1의 중간에 있어 담수와 오염물질 유입 모두에 의해 약간씩 영향을 받을 가능성이 높다. D 군집은 제1 주성분과 제2 주성분과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 5a). 이것은 D 군집에 소속한 정점들은 담수나 오염물질 유입에 의한 영향을 크게 받지 않는다는 것을 지시해준다. 따라서 정점 1, 2, 4, 5를 제외한 나머지 정점들은 겨울철에 담수나 오염물질 유입이 많지 않은 청정해역으로 생각된다.

봄철 진해만 표층해수는 5개의 군집으로 나누어진다 (Fig. 4b); A 군집(정점 5), B 군집(정점 1), C 군집(정점 3), D 군집(정점 6), E 군집(나머지 정점). A 군집은 암모니아, 용존무기질소, 질산염, 부유물질, 인산염, 용존유기탄소 등과 높은 상관관계를 갖는 제1 주성분에서 높은 요인부하량을 보이는 것으로 보아(Fig. 5b), 주로 오염물질 유입에 의한 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 봄철 정점 5에서 표층해수에서 질산염, 규산염, 부유물질, 인산염, 용존유기탄소 농도가 다른 정점들에 비해 특별히 높은 것은 오염물질 유입이 많았기 때문이다. B 군집은 규산염, 인산염, 용존무기질소 등과 높은 상관관계를 갖는 제2 주성분에서 높은 요인부하량을 보이는 것으로 보아, 주로 담수 유입에 의한 영향을 받는 것으로 생각된다. 마산만 안쪽정점인 정점 1에서 봄철 표층해수에서 규산염, 인산염 농도가 높은 것은 담수 유입이 많았기 때문이다. C 군집은 제1 주성분 뿐만 아니라 제2 주성분과도 음의 상

관관계를 보이는 것으로 보아, 아마 제3 주성분에 의해 밀접한 상관관계를 보이는 것으로 생각된다. C 군집에 속한 정점 3에서 관측한 부유물질 농도는 다른 정점에서 관측한 것보다 2배 가량 높아(Fig. 3), C 군집이 제3 주성분인 부유물질의 영향을 받았다는 것을 입증해준다. D 군집은 제1 주성분과 높은 상관관계를 보이거나 A군집에 비해 점수가 절반 밖에 되지 않는 것으로 보아(Fig. 5b), D 군집도 A 군집과 마찬가지로 오염물질 유입에 의해 영향을 받았지만, 그 영향이 A 군집에 비해 상대적으로 작은 것으로 판단된다. E 군집은 제1 주성분과 제2 주성분과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다(Fig. 5b). 이것은 E 군집에 속한 정점들은 담수나 오염물질 유입에 의한 영향을 크게 받지 않는다는 것을 지시해준다. 따라서 정점 1, 3, 5, 6을 제외한 나머지 정점들은 겨울철에 담수나 오염물질 유입이 많지 않은 청정해역으로 생각된다.

주성분분석을 통해 겨울과 봄에 진해만 표층해수 수질은 주로 담수와 오염물질 유입에 의해 결정된다고 파악되었다. 군집분석 결과, 한 군집에 주로 하나의 정점만 포함되는 경우가 많은데, 이것은 담수와 오염물질 유입이 진해만 전체적으로 일어나는 것이 아니라 특정해역에 국한되어 일어나기 때문이다. 담수와 오염물질이 유입되는 해역에서의 수질은 다른 해역에 비해 상당히 다른 수질 특성을 보이기 때문에 한 군집으로 분류된다. 군집분석 결과에 의하면, 진해만에서 담수와 오염물질 유입은 주로 마산만(정점 1과 2)과 행암만(정점 5)에서만 일어나는 것으로 판명되었다. 물론, 다른 해역에서도 담수와 오염물질이 어느 정도 유입되지만, 표층해수 수질에는 큰 영향을 미치지 못하는 것이다. 따라서 진해만 수질을 향상시키기 위해서는 마산만과 행암만의 수질을 중점적으로 관리해야 할 필요가 있다. 한 가지 특이한 사항은 겨울에는 마산만에서 오염물질 영향이 크게 나타났고 행암만에서 담수 영향이 크게 나타난 반면, 봄에는 반대로 마산만에서 담수 영향이 크게 나타났고 행암만에서 오염물질 영향이 크게 나타난 것이다. 이것은 진해만으로 유입되는 오염물질 유입 경로가 계절에 따라 다르다는 것을 지시해준다. 따라서 보다 철저한 진해만 수질관리를 위해서는 계절에 따라 오염물질이 진해만으로 유입되는 경로가 달라지는 이유를 파악하는 것이 필요하다.

5. 결 론

겨울과 봄에 진해만 표층해수 수질에 영향을 미치는 주요 요인들을 파악하고 지역적 분포 특성을 파악하기 위하여 주성분분석과 군집분석을 수행하였다. 주성분분석 결과, 겨울철 진해만 표층해수 수질에 영향을 미치는 주요 요인들은 담수유입, 오염물질 유입, 생물활동 순으로 나타

났고, 봄철에는 오염물질 유입, 담수유입, 부유물질 순으로 나타났다. 겨울과 봄에 진해만 수질에 영향을 미치는 요인들이 다르게 나타났는데, 가장 특징적인 차이는 겨울에는 오염물질의 유입에 의한 영향보다 담수 유입에 의한 영향을 더 많이 받았고 봄에는 반대로 담수 유입에 의한 영향보다 오염물질의 유입에 의한 영향을 더 많이 받은 것이다. 따라서 진해만에서는 겨울에 비해 봄에 오염물질 유입에 의한 영향을 더 많이 받기 때문에 겨울보다 봄에 더 집중적으로 오염물질 유입을 관리해야 한다. 또한, 진해만에서 담수와 오염물질 유입이 주로 마산만과 행암만에서 일어났기 때문에, 진해만 수질을 향상시키기 위해서 마산만과 행암만의 수질을 중점적으로 관리해야 한다.

사 사

본 연구에 많은 도움을 주신 연구선 장목호 선생님과 송조원 여러분께 감사드립니다. 또한 현장조사에 많은 도움을 주신 남해연구소 현봉길, 신현호 박사님께도 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구원의 기본사업인 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양생태계 건강지수 개발(PE98582)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강시환, 유승협, 오병철, 박광순, 김상익 (2000) 마산·창원 하수종말처리장 증설에 따른 근역회석을 변화 예측. 한국해양안·해양공학회지 **12**:53-69
- 임동일, 김영옥, 강미란, 장풍국, 신경순, 장만 (2007) 한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한 인자. Ocean and Polar Res **29**:349-366
- 이무강, 황정옥, 최영광 (1996) 다변량 해석에 의한 마산만 저층수의 수질평가. 한국환경과학회지 **5**:15-23
- 조현서, 이대인, 윤양호, 이문옥, 김동명 (2004) 진해만 서부해역의 하계 수질의 시간변동 특성. 한국해양환경공학회지 **7**:13-21
- 조홍연, 채장원 (1998) 진해-마산만 오염부하량의 특성분석. 한국해양안·해양공학회지 **10**:132-140
- 조홍연, 채장원 (1999) 진해-마산만 일반수질 항목 및 영양염류의 장기추이분석. Ocean Res **21**:13-25
- 조홍연, 채장원, 정신태 (2000) 하수처리장 건설에 의한 마산만의 오염무리질 수지변화. 한국해양안·해양공학회지 **12**:149-155
- 조홍연, 채장원, 전시영 (2002) 진해-마산만의 성층화 및 DO 농도변화. 한국해양안·해양공학회지 **14**:295-307
- Dickson AG, Sabine CL, Christian JR (2007) Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. PICES Special Publication 3, 199 p
- Dixon W, Chriswell B (1996) Review of aquatic monitoring program design. Water Res **30**:1935-1948
- Giordani G, Zaldivar JM, Viaroli P (2009) Simple tools for assessing water quality and trophic status in transitional water ecosystems. Ecological Indicators **9**:982-991
- Jang P-G, Shin K, Chang M, Kim D (2011) Spatial and temporal trends in water quality in response to sewage discharge in Masan and Hangan bays, Korea. Mar Pollut Bull (submitted)
- Lee CW, Min BY (1990) Pollution in Masan Bay, a matter of concern in South Korea. Mar Pollut Bull **21**:226-229
- Lee MO, Kim JK (2008) Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea. Mar Environ Res **65**:128-147
- Lim HS, Diaz RJ, Hong JS, Schaffner LC (2006) Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal waters. Mar Pollut Bull **52**:1517-1526
- Pesce S, Wunderlin DA (2000) Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba city (Argentina) on Suquia River. Water Res **34**:2915-2926
- Shrestha S, Kazama F (2007) Assessment of surface water quality using multivariate statistical technique: A case study of the Fuji river basin, Japan. Environ Modelling & Software **22**:464-475
- Singh KP, Malik A, Mohan D, Sinha S (2004) Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variation in water quality of Gomti River (India) - a case study. Water Res **38**:3980-3992
- Stambuk-Giljanovic N (1999) Water quality evaluation by index in Dalmatia. Water Res **33**:3423-3440
- Wang CH, Qi YZ, Li JT, Xu N, Chen JF (2004) Analysis and evaluation trophic status in aquaculture areas of Daya Bay. Mar Environ Sci **23**:25-28
- Williams M, Logstaff B, Buchanan C, Llanso R, Dennison W (2009) Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health. Mar Pollut Bull **59**:14-25
- Wu M-L, Wang Y-S (2007) Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China. Estuar Coast Shelf Sci **72**:732-742
- Wu M-L, Wang Y-S, Sun C-C, Wang H, Dong J-D, Yin J-P, Han S-H (2010) Identification of coastal water quality by statistical analysis methods in Daya Bay, South China Sea. Mar Pollut Bull **60**:852-860
- Zhou F, Guo H, Liu Y, Jiang Y (2007) Chemometrics data analysis of marine water quality and source identification in Southern Hong Kong. Mar Pollut Bull **54**:745-756

Received Jan. 27, 2011

Revised Jun. 24, 2011

Accepted Sep. 9, 2011