

한국 남해 연안역에서 여름 홍수기에 형성된 연안 염하구 환경의 물리-화학적 특성

임동일^{1*} · 엄인권¹ · 전수경² · 유재명³ · 정희수¹

¹한국해양연구원 지구환경연구본부

²목포대학교 해양자원학과

³한국해양연구원 생태환경연구본부

Physiochemical Characteristics of Coastal Pseudo-Estuarine Environment Formed During the Summer Flood season in the South Coast of Korea

DHONG-IL LIM^{1*}, IN-KWON UM¹, SOO-KYUNG JEON², JAE-MYUNG YOO³ AND HOI-SOO JUNG¹

¹Global Environment Research Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

²Department of Marine Resources, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

³Eco-Environment Research Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

본 논문은 섬진강 담수가 해양으로 유입하는 남해의 여름해협-소리도 연안 해역에서 홍수기(일평균 강우량 50 mm 이상이 10일간 지속) 동안 형성된 염하구 환경의 물리-화학적 특성(공간분포 및 조절인자)에 관하여 조사·연구한 결과이다. 섬진강 담수는 해수와 비교하여 수온, 염분, pH가 낮고 COD와 영양염(특히 질산염) 농도가 높은 특성을 갖는다. 겨울철 갈수기와 달리 여름철 홍수기에는 이러한 특성의 담수가 섬진강 하구에서 약 20~60 km 떨어진 전 연구해역으로 유입·확산되어 광범위한 염하구 환경을 형성하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서는 여름철 홍수기 동안 일시적으로 형성되는 염하구를 일반적인 강 하구의 염하구(river estuary)와 구분하여 “연안 염하구(coastal pseudo-estuary)”로 정의 하고자 한다. 한편, DIN/DIP 비는 겨울철 갈수기보다 여름철 홍수기에 훨씬 더 높으며, 이는 일반적으로 논에서 사용되는 질소 화학비료 때문인 것으로 해석된다. 이러한 연안 염하구 환경의 해수중에서 물리-화학적 인자들의 공간 분포와 거동 특성은 일차적으로 섬진강이 공급하는 담수와 해수의 물리적 혼합과 이 과정에서 일어나는 탈착 및 기타 생지화학적 요인 등에 의해 조절되는 것으로 해석된다. 본 연구에서 제시된 연안 염하구 환경 특성은 전반적으로 강 하구의 염하구 환경 특성과 크게 다르지 않은 것으로 판단된다.

In this study, we investigated the physiochemical characteristics of temporal estuarine environment formed during the summer flood season (consecutive rainy days with average 50 mm day⁻¹ precipitation) in the coastal area of South Sea of Korea. The freshwater from the Seomjin River was characterized by lower temperature, salinity and pH, and high concentrations of COD and nutrients. In the summer flood season, such peculiar Seomjin-River freshwater was dispersed southward along the coast of Yeosubando-Dolsando-Geumodo, forming temporal estuarine environment (defined as "Coastal Pseudo-Estuary" in this study) throughout the entire study area (as far as 60 km from the Seomjin River mouth). Compared to the winter dry season, the DIN/DIP ratio was almost doubled (16–36) during the summer flood season. This excessive nitrate supply during the summer flood season was probably due to nitrogenous fertilizer. Distribution and behaviors of physiochemical factors in this coastal pseudo-estuarine environment were controlled not only by the runoff of the Seomjin River (physical mixing of river water with seawater) but also by the biogeochemical estuarine processes which are mostly similar to those of the river estuary.

Key words: Coastal Pseudo-Estuary, Physiochemical Characteristics, DIN/DIP Ratio, South Coast

*Corresponding author: oceanlim@kordi.re.kr

서 론

염하구(estuary)는 육상과 해양 환경의 전이지역으로, 수용액의 물리·화학적 특성이 담수 또는 해수와 크게 다를 뿐만 아니라 생지화학 반응이 매우 역동적인 환경이다. 특히 염하구는 담수와 해수의 물리적 혼합, 생물에 의한 흡수, 유기물의 지화학적 분해, 그리고 무기물질과의 흡·탈착 현상이 활발히 일어나는 등 첨가와 제거 작용과 같은 일차적인 물리·화학적 반응조(reaction place) 역할을 한다. 염하구 시스템을 통과한 물질들은 해양으로 최종 유입되어 해양물질 순환 및 해양생태계의 역할에 중요한 역할을 한다. 연근해에서 자주 발생하는 적조(특히 규조류 적조)의 원인이 주로 육상물질(주로 영양염)의 유입과 직·간접적으로 관계가 있는 것으로 보고 되고 있으며(김, 1989; Wong *et al.*, 1998; Yu *et al.*, 2001; 유 등, 2002), 이러한 측면에서 연안 및 염하구 환경에서 일어나는 해양학적 현상을 자세히 이해할 필요가 있다.

한반도 남해 중부에 위치한 연구해역(여수해협-소리도 해역)은 국내 5대 강의 하나인 섬진강의 담수가 해양으로 유입되는 통로 역할을 하는 연안역이다. 더욱이 섬진강과 연구해역 사이에 위치한 광양만 주변에는 제철소, 비료공장과 같은 많은 산업시설들이 집중되어 있어 인위적 기원 물질의 공급이 우려된다. 남해 연안역에서 자주 발생하는 적조 또한 광양만과 섬진강 등 주변 강이나 하천에서 공급되는 육상기원 영양염 물질과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고 되고 있으며(양 등, 2000; 정 등, 2000; 권 등, 2001a; 이 등, 2001a; 최, 2001), 일부 여름철 홍수기 동안 양자강에서 유입되는 많은 양의 담수 또한 또 다른 영양염의 공급원으로 알려져 있다(김 등, 1998; 양 등, 2000). 한편, 섬진강의 담수량에 따라 염하구 환경의 범위는 매우 유동적으로 나타나며, 섬진강이 공급하는 영양염의 농도와 확산범위도 계절에 따라 큰 차이를 보인다(Shim *et al.*, 1984; Kim *et al.*, 1988; Kim, 1992; 권 등, 2001a; 권 등, 2001b). 그러나 기존 연구의 대부분이 광양만과 섬진강 하류의 하구환경에 집중되었기 때문에 섬진강 담수의 최대 확산범위와 이에 따른 육상기원 영양염이 해양으로 유출되는 최대 범위 등에 관한 보고는 아직 없다. 본 연구에서는 여름철 홍수기와 겨울철 갈수기 동안 해수의 물리·화학적 인자들의 시·공간적 변화 특성을 밝히고, 그 원인을 해석함으로써 여름철 홍수기 동안 형성된 계절적 염하구 환경의 특성과 확산범위를 이해하고자 한다.

본 연구의 대상해역은 한반도 남해안의 중부에 위치하며, 여수해협을 포함한 여수반도에서 소리도 해역까지이다(Fig. 1). 연구해역의 북쪽으로는 유역면적 4,897 km²의 섬진강이 있으며, 연간 약 30억 톤의 담수를 배출한다(김, 1968). 섬진강 하류에는 인구 약 40만 명의 광양시와 순천시와 있으며, 광양제철소와 여천국가산업단지를 포함하는 광양만이 위치한다. 따라서 섬진강과 광양만이 공급하는 대부분의 물질은 연구해역인 여수해협을 통하여 외해로 이동된다. 이 등(2001b)은 광양만 주변 화학단지에서 생산되는 인산비료와 복합비료가 인산염의 점오염원(point source)임을 제시한 바 있다. 더욱이 홍수기에는 평상시보다 많은 양의 지하수, 생활하수 및 공장폐수를 함유한 담수가 유입될 수 있는 해역이다. 한편, 연구해역의 남쪽으로는 쿠로시오의 지류인 대마난류의 영향을 받은 외해수가 유입되어 평상시(또는 갈수기)에는 외해수의 유입이 우세할 것으로 보인다(김 등 1998; 이와 김, 1998; 이, 1999).

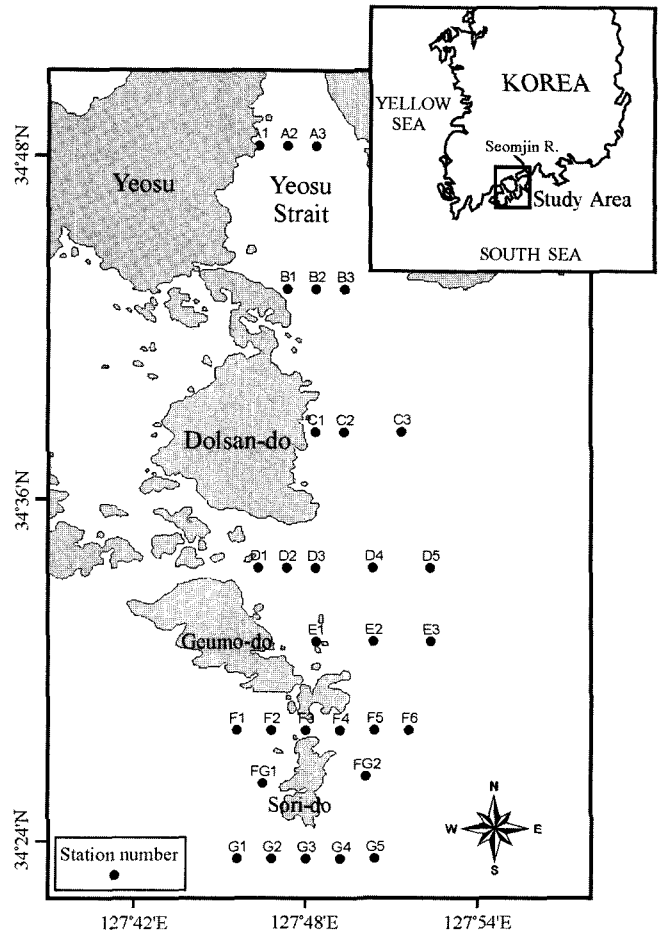


Fig. 1. Map showing the study area and sampling sites with sample numbers.

현장조사 및 분석방법

본 연구를 위해 남해 중부에 위치한 여수-소리도 연안역에서 표층 해수의 물리·화학적 인자들의 현장 관측과 해수 시료 채취가 여름철(2002년 8월 14일)과 겨울철(2003년 1월 7일)에 각각 30개 정점에서 수행되었다. 섬진강 유역(순천시지역)의 2002년 7월과 8월의 강우량은 약 1,116 mm로, 연 총 강우량(약 1,913 mm)의 58% 이상이며, 현장조사 직전의 8월 6일부터 14일까지는 매일 평균 50 mm 이상(최대 160 mm)의 강우량을 기록하였다(기상청, 2002). 더욱이 2002년의 여름철 강우량은 지난 30년간의 이 지역 여름철 평균 강우량(약 600 mm) 보다 2배 이상 많은 것으로 매우 이례적인 홍수기를 기록하고 있다. 한편, 겨울철에는 11월과 12월 동안의 강우량은 약 69 mm로 1년 총 강우량의 5% 미만이며, 조사 직전의 15일 동안에는 강우량을 기록하고 있지 않다(기상청 2002). 이러한 기상자료에 근거하여, 본 연구에서는 2002년 8월 14일의 여름철 조사의 결과를 홍수기 그리고 2003년 1월 7일의 겨울철 조사 결과를 갈수기를 대표하는 것으로 구분하였다. 특징적으로 여름철 현장조사 동안 정점 C3, E2, F4 및 G1 주변역에서는 적조 현상이 관찰되었다.

표층 해수의 수온, 염분, 수소이온농도(pH) 및 용존산소량

결과 및 토의

연안 염하구 환경의 형성과 물리·화학적 특성

여름철 홍수기와 겨울철 갈수기에 각각 조사·분석된 표층 해수의 수온과 염분 등의 물리적 특성과 수소이온농도(pH), 용존산소량(DO), 화학적산소요구량(COD), 용존무기질소(DIN) 및 용존무기인(DIP) 등의 화학적 특성에 대한 분석결과를 Table 1에 제시하였다.

수온, 염분, 수소이온농도(Fig. 2A, B and C): 여름철 홍수기의 수온은 21.9~22.7°C 범위(평균 22.4±0.2°C)이며, 좁은 범위의 온도 변화이지만 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 겨울철 갈수기의 수온은 6.4~10.9°C 범위(평균 9.2±1.3°C)이며, 북쪽의 여수해협에서 7°C 내외로 가장 낮고 외해(남동방향)로 갈수록 점이적으로 높아지는 뚜렷한 변화를 보인다. 염분의 경우, 홍수기에는 13.0~31.6 psu(평균 25.3±5.2 psu) 범위의 넓은 변화 폭을 보이며, 북쪽의 여수해협에서부터 외해(남동 방향)로 갈수록 점이적으로 증가한다. 갈수기 염분은 32.6~33.4 psu 범위(평균 33.2±0.2 psu)이며, 여수해협에서 낮은 것을 제외하면 뚜렷한 공간변화는 관찰되지 않는다. 수소이온농도(pH)의 경우, 여름철 홍수기에는 7.65~7.97 범위(평균 7.85±0.10)를 보이며, 북쪽의 여

(dissolved oxygen, DO)은 다항분석기(Multi-analyzer, Model YSI-556)를 이용하여 현장에서 2~3회 반복 관측한 평균값을 사용하였다. 영양염류와 화학적 산소요구량 분석을 위해 현장에서 채취한 해수 시료를 GF/C 여과지로 여과한 후, 여액을 폴리에틸렌 용기에 담아 냉동 보관하여 실험실로 옮겼다. 실험실에서 인산염은 몰리브덴산 암모늄(ammonium molybdate) 용액, 황산, 아스코르빈산(ascorbic acid), 타르타르산 안티모닐 칼륨(potassium antimonyltartrate) 용액의 혼합 시약으로 반응시킨 후 885 nm에서 정량하였다(Parsons *et al.*, 1984). 암모늄은 페놀로 고정후 니트로프루시드 나트륨(sodium nitroprusside) 용액, 알칼리 용액, 치아염소산 나트륨(sodium hypochlorite) 용액, 산화제로 반응시킨 후, 640 nm에서 정량하였다(Solorzano, 1969). 아질산염은 설퍼닐아미드(sulfanilamide) 용액과 나프틸에틸렌디아민염산염(naphthylene diamine dihydrochloride) 용액으로 반응시킨 후, 543 nm에서 그리고 질산염은 Cd-Cu 환원 칼럼을 통하여 아질산염으로 환원시킨 후, 아질산염과 동일한 방법으로 정량하였다(Parsons *et al.*, 1984).

본 연구에서 얻어진 자료들의 통계분석 처리(correlation coefficient, cluster analysis, R-mode factor analysis)는 SPSS 프로그램을 이용하였다.

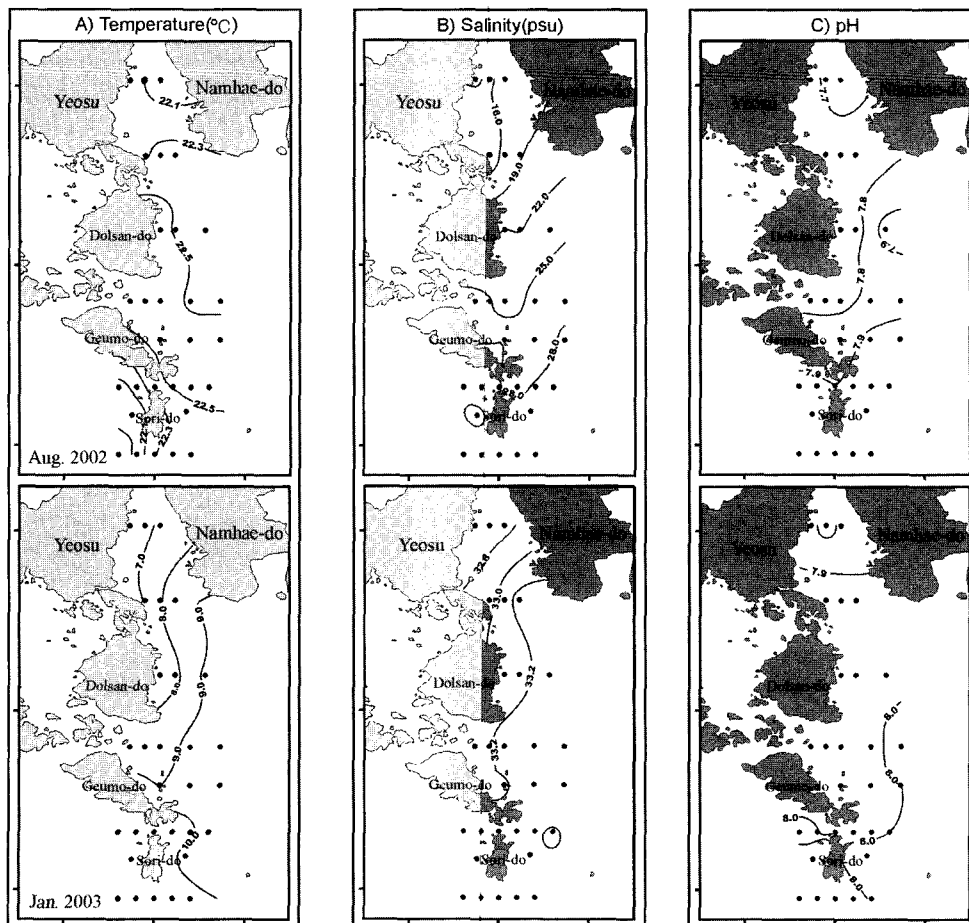


Fig. 2. Spatial variations of physiochemical parameters measured during the summer flood season (Aug. 2002) and winter dry season (Jan. 2003).

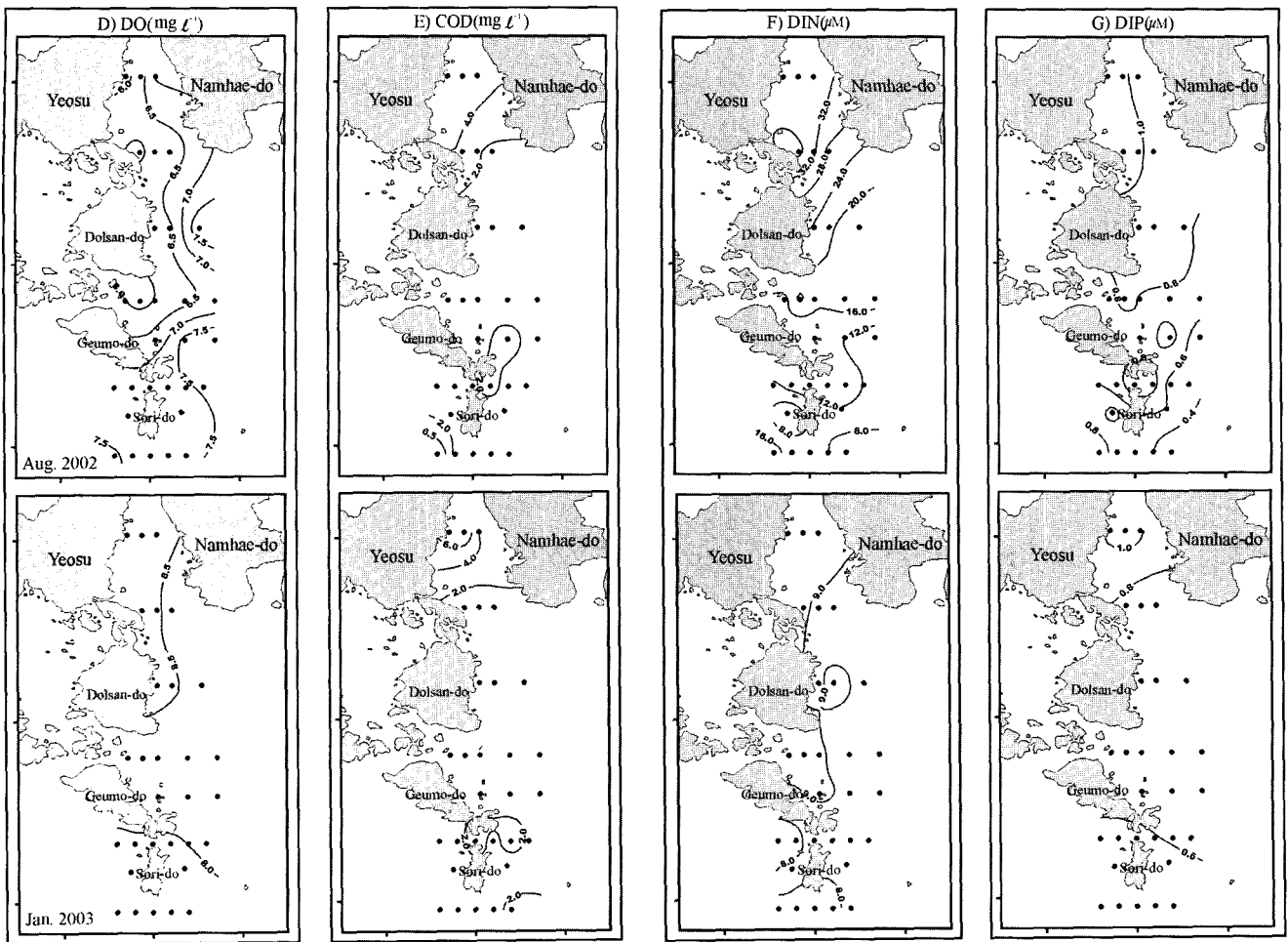


Fig. 2. continued.

수해협에서 금오도 해역까지는 7.8 미만으로 낮고, 금오도의 남쪽 해역에서는 7.8 이상으로 높다. 예외적으로 정점 C3와 E2 및 E3에서는 주변 정점들 보다 상대적으로 높은 pH 값이 나타난다. 겨울철 갈수기의 pH는 7.70~8.06 범위(평균 7.96±0.07)로 여름철 보다 높으며, 북쪽의 여수해협-돌산도 해안에서 낮고 외해에서 다소 높다.

수온, 염분 그리고 pH의 계절적 공간분포 특성에 의하면, 연구해역은 홍수기인 여름철과 갈수기인 겨울철에 표층 해수의 물리적 특성이 크게 다른 것으로 나타났다. 홍수기에는 염분의 경사가 남북방향으로 20 psu 이상으로 크며, 여수해협에서 금오도에 이르는 넓은 해역이 일반적인 해수 보다 약 10 psu 이상 낮은 염분 특성을 보인다. 염분의 공간 분포 특성은 섬진강 담수가 여수만도-돌산도-금오도로 연결되는 해안선을 따라 확산되고 있음을 보여준다. 갈수기 경우 염분이 평균 33.2 psu로 전형적인 연안해역 값을 나타낸다. 그러나 수온과 염분의 공통적인 공간 분포 특성은 홍수기와 비슷하게 갈수기인 겨울철에도 담수의 유입이 여수해협으로부터 해안선을 따라 확산되고 있음을 보여주며, 그 확산 범위는 돌산도 주변 해역까지로 판단된다. 계절에 따른 담수의 유입과 확산 정도는 pH의 계절적 공간분포에서도 뚜렷하며, pH 값은 북쪽의 여수해협에서 낮고, 홍수기 동안 상대적으로

더 낮게 관측되어 염분과 같이 담수 유입의 또 다른 지시자로 제시될 수 있다. 결론적으로 홍수기 동안에는 광범위한 연안 해역이 일시적으로 염분 환경으로 변화하며, 해양으로 유입되는 담수는 해수와 비교하여 상대적으로 낮은 온도, 염분 그리고 pH 특성을 갖는다.

용존산소, 화학적산소요구량(Fig. 2D and E): 여름철 홍수기에 용존산소량은 5.8~8.0 mg l⁻¹(평균 6.9±0.6 mg l⁻¹)범위이며, 겨울철 갈수기에는 7.9~8.9 mg l⁻¹(평균 8.3 ± 0.3 mg l⁻¹) 범위로 여름철 보다 높다. 이러한 원인은 계절적인 온도 변화에 의한 것으로 해석된다. 홍수기 동안 용존산소는 남쪽으로 갈수록 증가하여, 여수해협에서 금오도에 이르는 북쪽 해역에서는 6.5 mg l⁻¹ 미만으로 낮고, 금오도 남쪽 해역에서는 7.0 mg l⁻¹ 내외로 높다. 특징적으로 정점 C3, E2, E3 그리고 G1 정점에서 용존산소는 7.5 mg l⁻¹ 이상으로 주변 정점과 비교하여 크게 높다. 홍수기와 대조적으로 갈수기에는 여수해협에서 돌산도에 이르는 해안선 근역에서 8.5 mg l⁻¹ 이상으로 높으며, 나머지 해역에서는 남쪽으로 갈수록 뚜렷이 감소하여 수온 변화와 잘 일치한다.

여름철 홍수기에 화학적산소요구량(COD)은 0.2~6.5 mg l⁻¹(평균 1.7±1.9 mg l⁻¹) 범위의 큰 변화 폭을 보이지만, 3 mg l⁻¹ 이상의 높은 농도를 보이는 여수해협(Line A와 B)을 제외하면 대부분

Table 1. Data of physiochemical parameters of surface water investigated during the summer flood season (upper) and the winter dry season (lower).

Station No.	Depth (m)	Temp. (°C)	DO		pH	Salinity (psu)	COD (mg l ⁻¹)	DIN (μM)			Phos. (μM)	DIN/DIP ratio
			(mg l ⁻¹)	(%)				Nitrite	Nitrate	Amm.		
A1	8.4	22.2	5.9	74	7.79	16.4	5.9	1.0	29.2	3.4	1.0	32.3
A2	16.3	22.1	6.3	79	7.65	15.5	5.6	0.9	32.0	3.2	1.0	34.7
A3	18.8	21.9	7.1	87	7.67	17.4	4.9	1.1	29.7	3.1	0.9	35.9
B1	18.0	22.3	6.7	84	7.70	13.0	3.9	0.9	33.2	3.0	1.1	33.3
B2	19.1	22.4	6.1	79	7.73	17.7	2.2	1.2	28.7	2.9	1.1	30.8
B3	21.1	22.4	6.2	80	7.73	19.0	1.6	1.0	23.6	1.9	0.9	29.7
C1	14.9	22.7	6.3	83	7.76	22.1	0.5	1.0	20.9	1.9	0.9	26.0
C2	15.5	22.4	6.4	83	7.75	21.8	0.6	0.8	18.3	1.7	1.0	21.0
C3*	17.8	22.5	8.0	107	7.95	24.2	1.9	0.7	13.8	1.9	0.8	20.1
D1	29.1	22.6	6.0	81	7.78	26.2	1.2	0.8	12.7	0.9	0.6	23.3
D2	25.2	22.6	5.8	78	7.78	25.6	0.5	1.3	17.8	2.1	1.0	21.9
D3	16.8	22.7	6.0	80	7.77	21.6	0.9	0.7	14.3	1.3	0.8	21.3
D4	17.3	22.5	6.4	85	7.82	26.9	0.4	1.0	16.3	1.2	0.8	24.2
D5	21.6	22.5	6.6	88	7.84	27.0	0.3	1.1	16.2	1.1	0.8	24.0
E1	29.9	22.6	6.7	90	7.85	28.0	0.9	0.9	10.4	1.5	0.6	19.9
E2*	27.3	22.6	7.7	103	7.93	26.3	3.3	1.0	8.6	2.4	0.9	13.4
E3	28.2	22.6	7.9	108	7.97	28.7	0.5	0.6	7.2	1.4	0.4	22.0
F1	37.4	22.0	7.4	101	7.93	30.5	0.3	0.8	8.0	2.6	0.6	19.1
F2	43.6	22.2	7.1	96	7.91	29.7	0.7	0.9	10.2	2.7	0.7	19.9
F3	37.0	22.4	7.2	98	7.90	28.0	1.2	0.9	11.3	2.8	1.0	15.5
F4*	52.0	22.5	7.4	100	7.91	27.7	3.4	1.1	10.1	3.4	0.9	16.3
F5	54.4	22.6	7.4	101	7.92	28.2	0.5	0.8	11.0	2.7	0.5	29.2
F6	48.2	22.6	7.6	104	7.94	28.7	0.6	0.7	9.4	1.7	0.5	25.1
FG1	35.4	21.9	7.2	99	7.93	31.6	0.7	0.6	3.1	0.4	0.3	12.5
FG2	37.2	22.4	7.1	97	7.92	29.3	0.5	0.8	9.8	1.1	0.6	19.8
G1*	52.8	22.5	7.6	103	7.94	28.5	6.5	0.8	10.6	3.2	0.9	16.8
G2	57.0	22.0	7.0	96	7.91	31.1	1.2	0.7	5.7	2.6	0.4	24.2
G3	51.1	22.3	7.3	99	7.92	29.2	0.3	0.7	6.7	2.5	0.6	16.6
G4	61.3	22.5	7.0	96	7.90	28.9	0.6	0.7	6.7	0.7	0.4	20.5
G5	58.4	22.3	7.4	102	7.95	31.0	0.2	0.3	4.4	0.6	0.2	21.9
A1	9.4	6.4	8.8	89	7.87	32.6	6.6	0.8	8.9	3.0	1.0	12.6
A2	17.7	6.9	8.8	89	7.70	32.7	8.6	0.9	9.2	2.7	1.2	11.0
A3	22.3	7.1	8.7	89	7.85	32.7	3.6	0.8	7.2	1.9	1.0	9.8
B1	19.8	7.0	8.9	91	7.95	32.9	0.6	0.7	7.3	1.4	0.8	12.3
B2	20.7	7.8	8.7	91	7.95	33.1	0.6	0.6	6.9	0.9	0.7	12.6
B3	22.5	9.0	8.0	86	7.92	33.3	1.6	0.6	6.4	1.3	0.6	12.8
C1	16.2	7.3	8.7	89	7.95	33.0	0.9	0.7	7.0	0.9	0.7	12.0
C2	16.8	7.8	8.6	90	7.96	33.1	0.7	0.7	7.7	1.3	0.7	13.5
C3	18.8	9.2	8.3	89	7.97	33.3	1.2	0.5	7.3	0.7	0.6	13.1
D1	27.3	8.4	8.2	87	7.97	33.2	1.3	0.4	7.8	1.2	0.7	14.1
D2	24.9	8.9	8.4	90	7.97	33.2	1.3	0.2	8.1	0.8	0.7	13.7
D3	17.8	8.3	8.5	89	7.96	33.3	0.6	0.4	7.3	1.5	0.7	13.8
D4	18.0	9.4	8.1	87	7.96	33.4	0.5	0.4	7.1	0.7	0.6	12.6
D5	22.1	9.6	8.0	87	8.06	33.3	0.9	0.3	7.7	0.5	0.6	13.3
E1	26.0	9.0	8.5	91	7.97	33.2	1.1	0.3	7.9	1.0	0.7	13.8
E2	28.5	9.5	8.3	91	7.98	33.3	1.2	0.3	8.0	0.5	0.6	13.8
E3	28.4	9.6	8.3	92	8.00	33.4	0.9	0.4	6.4	1.4	0.6	13.7
F1	37.1	10.9	7.9	90	8.01	33.3	0.9	0.0	6.9	0.4	0.6	13.0
F2	43.2	10.7	8.0	89	8.00	33.3	0.5	0.0	6.9	0.4	0.6	13.0
F3	38.2	10.7	7.9	87	8.00	33.2	4.2	0.0	7.4	1.6	0.6	15.8
F4	54.4	10.5	7.9	87	7.99	33.2	0.9	0.0	7.4	0.5	0.6	13.4
F5	53.8	10.2	8.0	88	7.99	33.2	4.0	0.1	7.2	0.5	0.6	12.7
F6	48.0	9.5	8.1	88	8.00	33.2	1.0	0.1	7.6	1.5	0.6	14.3
FG1	32.9	10.6	8.0	88	7.99	33.2	0.3	0.0	7.8	0.5	0.6	14.0
FG2	35.3	9.7	7.9	86	8.02	33.2	0.4	0.1	7.3	0.8	0.5	15.0
G1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G2	61.0	10.4	8.0	89	7.94	33.2	0.5	0.1	7.4	0.4	0.6	13.2
G3	63.0	10.5	8.1	90	7.98	33.2	0.9	0.0	6.8	0.4	0.6	12.6
G4	63.0	10.4	8.2	90	7.99	33.2	0.9	0.0	7.0	0.6	0.5	14.0
G5	60.0	10.2	8.0	88	8.00	33.2	3.0	0.1	7.5	0.9	0.6	14.8

*denotes the stations with red tide incident.

Temp.: temperature, Amm.: ammonium, Phos.: phosphate

의 정점에서 0.5 mg l^{-1} 미만으로 일정하다. 예외적으로 정점 C3, E2, F3, F4, G1 및 G2에서 COD 농도는 주변 정점들 보다 상대적으로 높다. 겨울철 갈수기에 COD의 농도는 $0.3 \sim 8.6 \text{ mg l}^{-1}$ (평균 $1.7 \pm 2.0 \text{ mg l}^{-1}$) 범위로 홍수기와 비슷하여 여수해협에서 4 mg l^{-1} 이상으로 매우 높으며, 그 이외의 해역에서는 뚜렷한 변화 없이 1 mg l^{-1} 미만의 범위를 보인다. 한편 정점 F3과 F5에서는 예외적으로 4 mg l^{-1} 이상으로 주변 정점들 보다 높은 COD 농도를 갖는다.

전반적으로 용존산소와 COD의 공간분포 특성 또한 연구해역으로 유입되는 담수의 확산에 의해 조절 되는 것으로 해석된다. 여름철 홍수기에는 담수의 유입이 뚜렷한 여수해협에서 금오도에 이르는 해안역에서 수온이 상대적으로 낮음에도 용존산소량과 포화도가 뚜렷이 낮다(Fig. 2D and Table 1). 이러한 현상은 여름철 홍수기 동안 해양으로 유입되는 담수에는 상대적으로 용존산소가 낮게 함유되어 있음을 의미하며, 이러한 원인은 이동과정에서 나타날 수 있는 유기물 분해에 따른 용존산소의 소비에 따른 것으로 해석된다(Wang *et al.*, 1999). 겨울철 갈수기의 용존산소량 분포는 담수의 확산 패턴과 잘 일치하며, 여수해협에서 금오도에 이르는 해역에서 여름철과 반대로 용존산소의 농도가 높다. 이는 유입되는 담수의 온도가 해수보다 낮고, 이러한 낮은 온도가 높은 용존산소량의 주요인으로 제시된다. COD의 경우, 두 계절 모두 여수해협에서만 매우 높은 농도를 보여, 연구지역으로 유입되는 담수는 해수보다 항상 높은 COD 농도를 갖는다.

용존무기질소, 용존무기인(Fig. 2F and G): 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN, $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$)의 농도는 여름철 홍수기에 $4.0 \sim 37.1 \mu\text{M}$ 범위(평균 $17.6 \pm 9.2 \mu\text{M}$)로 정점별 큰 변화 폭을 보이며, 평균 농도는 남해의 연안해역과 비교할 때 2배 이상 높다(Table 2). 전반적으로 DIN의 농도는 여수해협에서 남쪽으로 갈수록 점이적으로 감소하는 뚜렷한 공간 변화를 보인다. 즉, 여수해협에서 돌산도 해역까지는 약 $20 \mu\text{M}$ 이상의 높은 농도가 분포하는 반면, 돌산도 남쪽 해역에서는 약 $9 \sim 20 \mu\text{M}$ 범위로 점이적으로 낮아진다. 이러한 변화는 DIN의 약 81%를 차지하는 질산염이 주도한다. 용존무기질소 중 아질산염과 암모늄염이 차지하는 비율은 각각 평균 6%(범위 2~8%)와 13%(범위 6~25%)이다. 아질산염 농도는 $0.9 \sim 1.0 \mu\text{M}$ 범위이며, 공간 변화는 뚜렷하지 않다(Table 1). 그러나 암모늄염의 경우, 전반적으로 용존무기질소의 공간 변화와 일치하여 여수해협에서 높고 남쪽으로 갈수록 감소하나, 특징적으로 가장 남쪽의 금오도와 소리도 사이의 제한된 해역에서 높게 나타났다(Table 1).

겨울철 갈수기에 DIN의 농도는 $7.2 \sim 12.7 \mu\text{M}$ 범위(평균 $8.8 \pm 1.3 \mu\text{M}$)로 정점별 농도 변화가 작고, 평균 농도 역시 여름철 홍수기와 비교하여 절반 이하로 낮다. 겨울철의 평균 농도는 다른 남해 연안과는 비슷하거나 조금 높다(Table 2). 여수해협 주변과 돌산도-금오도 사이의 해역에서 나타나는 $10 \mu\text{M}$ 이상으로 높은 정점들을 제외하면, 대부분의 정점에서 $8 \sim 9 \mu\text{M}$ 범위로 낮고, 일정하다. 이러한 공간변화 특성은 DIN의 약 85%를 차지하는 질산염 분포 패턴과 잘 일치한다. 용존무기질소 중 아질산염과 암모늄염이 차지하는 비율은 각각 평균 4%(범위 0~8%)와 11%(범위 5~24%)이며, 여름철 홍수기와 비슷하다. 암모늄염은 여수해협 주변과 금오도-소리도 사이의 해역에서 약 $4 \mu\text{M}$ 이상의 높은 값이 나타나는 경우를 제외하면, 대부분의 정점들에서 $1 \mu\text{M}$ 이하로 낮고, 일정하다. 아질산염은 여수해협에서 남쪽으로 가면서 $0.8 \mu\text{M}$ 에서 $0.1 \mu\text{M}$ 까지 점이적으로 감소하는 농도 분포를 보인다.

여름철 홍수기와 겨울철 갈수기 동안 용존무기인(dissolved inorganic phosphorus, DIP, PO_4^{3-})의 평균 농도(범위)는 각각 $0.7 \pm 0.2 \mu\text{M}$ ($0.2 \sim 1.1 \mu\text{M}$)과 $0.7 \pm 0.2 \mu\text{M}$ ($0.5 \sim 1.2 \mu\text{M}$)로 비슷하다. 홍수기의 경우 남쪽 방향으로 갈수록 뚜렷이 감소하는 경향을 보이며, 암모늄염 농도 분포와 유사하게 금오도-소리도 사이의 해역에서 다소 높은 농도 분포를 보인다. 대조적으로 겨울철 갈수기에는 여수해협에서 $1 \mu\text{M}$ 이상으로 높고, 나머지 해역에서는 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{M}$ 범위로 일정하다. 홍수기와 갈수기 모두 연구지역의 평균 농도는 남해의 다른 비교 해역과 비슷하다(Table 2).

전반적으로 DIN은 계절적(또는 시기적)으로 뚜렷한 농도 차이를 보이며, 홍수기 때의 농도가 갈수기보다 2~3배 이상 높다. 그러나 DIP는 홍수기와 갈수기 모두 비슷한 농도 범위를 갖는 것으로 밝혀졌다. 영양염의 공간 분포는 공통적으로 남북 방향의 농도 경사를 보이며, 연구해역 영양염 농도는 주로 계절적으로 차이를 보이는 섬진강의 배수량 및 DIN의 농도에 의해 조절됨을 알 수 있다. 한편, 섬진강 담수의 높은 DIN은 논에서 광범위하게 사용되는 질소 화학비료 때문인 것으로 추정된다.

군집분석: 위에서 서술된 물리·화학적 인자들의 공통적인 공간 변화와 그 원인을 종합적으로 분석하기 위해 각 정점별 수온, 염분, pH, 용존산소, COD, DIN 및 DIP의 자료를 이용하여 군집분석(cluster analysis)을 실시하였다. 여름철 홍수기에는 연구해역이 4개의 군집으로 구분되어지며, 군집 I(여수해협), II(돌산도와 금오도 사이의 해역) 그리고 III(금오도 남쪽 해역)이 북쪽에서 남쪽 방향으로 순차적으로 분포한다(Figs. 3 and 4). 군집 IV는 C3, E2,

Table 2. Comparison of average values of salinity, DIN, DIP and DIN/DIP ratios in surface waters close to the study area (modified from Lee *et al.*, 2001)

Site	Salinity(psu)	DIN(μM)	DIP(μM)	DIN/DIP	
Dungyang Bay	32.25	4.00	0.65	6.2	
Yeoja Bay	31.92	6.60	0.79	8.4	
Gamak Bay	32.50	7.13	0.87	8.3	
Gwangyang Bay	31.33	10.82	1.59	6.8	
Gwangyang Bay	Nov. 1999	29.20	13.59	3.41	4.1
	Sep. 2000	24.62	27.77	2.82	9.8
Study area	Aug. 2002	25.30	17.60	0.70	23.0
	Jan. 2003	33.20	8.80	0.70	13.3

Table 3. Average values of physiochemical parameters of each group based on the cluster analysis.

	Group	Temp. (°C)	DO (mg l ⁻¹)	pH	Salinity (psu)	COD (mg l ⁻¹)	Nitrite (μM)	Nitrate (μM)	Amm. (μM)	Phos. (μM)
Summer flood season (Aug. 2002)	I	22.2	6.4	7.71	16.0	4.5	1.0	30.5	3.1	1.0
	II	22.5	6.3	7.79	24.2	0.8	1.0	16.7	1.5	0.8
	III	22.3	7.3	7.93	29.7	0.6	0.7	7.5	1.7	0.5
	IV	22.5	7.6	7.93	26.9	3.3	0.9	10.9	2.7	0.9
Winter dry season (Jan. 2003)	I	6.6	8.8	7.79	32.7	7.6	0.9	9.0	2.8	1.1
	II	7.4	8.7	7.93	33.0	1.3	0.7	7.2	1.3	0.8
	III	9.8	8.1	7.99	33.3	1.3	0.2	7.3	0.8	0.6

F3, F4 그리고 G1의 정점들을 포함하며, 군집 III의 영역에 분산·분포한다. 각 군집별 인자들의 평균값과 범위를 살펴보면, 전반적으로 군집 I에서 III으로 갈수록 염분과 pH는 증가하며, 이와 함께 COD와 영양염류의 농도는 점이적으로 감소한다(Table 3). 홍수기 동안 이러한 군집의 분포와 농도 특성, 즉 연구해역의 수질 성분 및 영양염의 전반적인 공간변화는 많은 양의 담수 유입과 확산에 의해 지배되는 것으로 해석된다. 한편 군집 IV는 암모늄염, 인산염, 용존산소 그리고 COD의 농도에 있어서 군집 II와 III보다 뚜렷이 높으며, 질산염은 주변의 군집 III보다 다소 높다(Tables 1 and 3). 이러한 특성은 군집 IV가 적조가 발생했던 정점들과 일치하는 것에 근거할 때(Table 1), 해수와 담수의 물리적 혼합 보다는 해양환경에서 일어나는 생화학적 현상과 관련이 있는 것으로 보인다. 특히, 군집 IV에서 높은 용존산소량과 100% 이상의 높은 포화도는 식물플랑크톤의 대량번식(적조)에 따른 활발한 광합성 작용에 의한 산소의 방출에 따른 것으로 해석된다.

겨울철 갈수기에는 3개의 군집으로 나누어지며, 군집의 지역적 분포 특성은 여름철 홍수기와 유사하다(Figs. 3 and 4). 수온은 군집 I에서 가장 낮고 남쪽방향의 군집 III으로 갈수록 증가하며, 대조적으로 용존산소는 뚜렷이 감소한다. 염분과 pH의 경우, 군집 I에서 낮고 나머지 군집들에서는 비슷한 값을 보이거나 조금 높다. 영양염류중 아질산염과 암모늄염 농도는 여수해협 주변의

군집 I에서 남쪽의 소리도 주변의 군집 III으로 갈수록 감소하며, 질산염과 인산염은 군집 I에서 높고 나머지 군집에서는 비슷한 농도를 갖는다. COD의 농도는 군집 I에서 7.6 mg l⁻¹로 매우 높으나, 나머지 군집들에서는 1.5 mg l⁻¹ 미만으로 낮다. 이러한 분석 결과는 겨울철 갈수기 동안 연구해역의 군집 분포가 일차적으로 수온과 용존산소에 의해 구분되어지며, 이는 유입되는 담수의 낮은 수온과 높은 용존산소 그리고 남쪽 외해수(쿠로시오)의 높은 수온과 낮은 용존산소 특성 때문으로 해석된다. 또한 낮은 pH와 염분 그리고 높은 영양염류와 COD 농도는 군집 I이 담수의 특성을 반영하는 것으로 보아 겨울철 갈수기 동안 담수의 직접적인 영향은 군집 I이 분포하는 여수해협까지로 제한되는 것으로 판단된다.

이상에서 서술된 것처럼 연구해역으로 유입되는 담수의 특성과 확산 범위를 살펴보면, 낮은 염분과 pH 그리고 높은 COD와 영양염(주로 질산염) 농도를 갖는 담수가 겨울철 갈수기에는 매우 제한적으로 유입되지만 여름철 홍수기에는 전 연구해역에 광범위하게 유입·확산되어 염하구 환경을 형성하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 여름철 홍수기 동안 일시적으로 형성되는 염하구를 일반적인 강 하구의 염하구(river estuary)와 구분하여 “연안 염하구(coastal pseudo-estuary)”로 기술 하고자 한다.

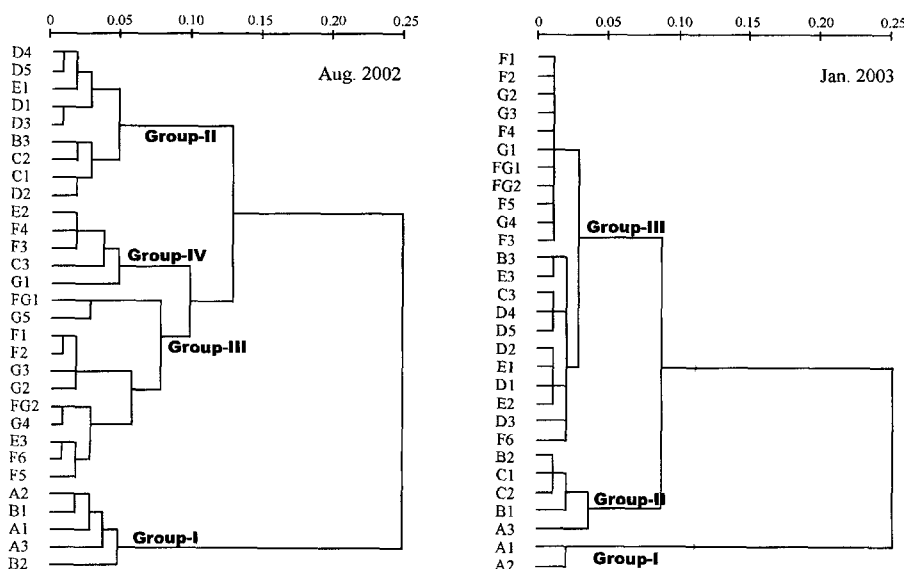


Fig. 3. Dendrograms by complete linkage (Euclidian distance) based on normalized data.

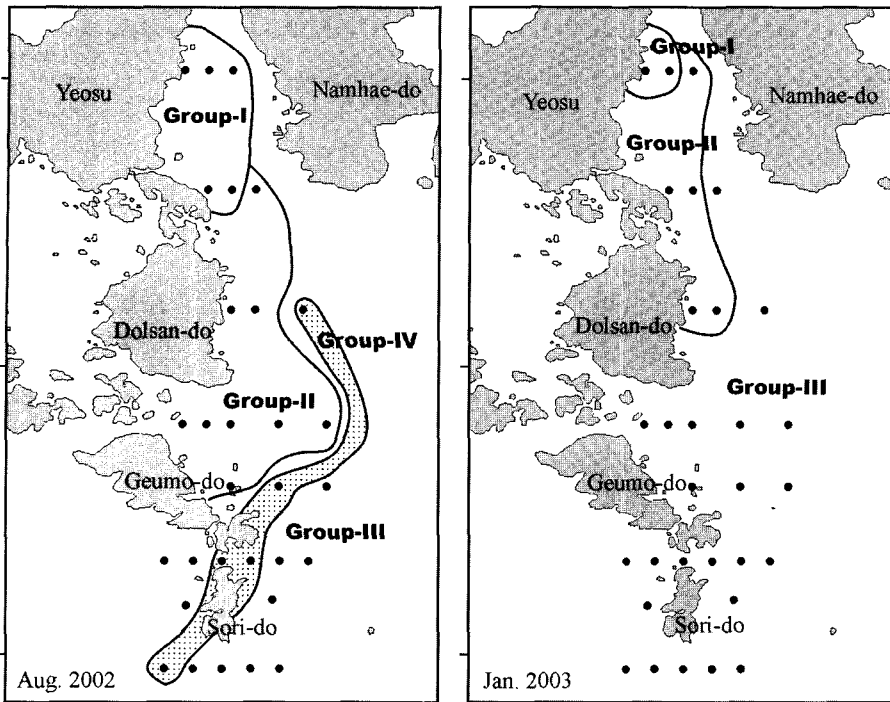


Fig. 4. Spatial distribution of station groups divided by cluster analysis, based on the physiochemical characteristics of surface water.

Table 4. Correlation matrices of physiochemical parameters.

a) Aug. 2002 (flood season)

	Temp.	DO	pH	Salinity	Nitrite	Nitrate	Phos.	Amm.	COD
Temp.	1								
DO	-0.08	1							
pH	0.10	0.79	1						
Salinity	0.07	0.57	0.87	1					
Nitrite	0.13	-0.50	-0.53	-0.46	1				
Nitrate	-0.13	-0.60	-0.89	-0.96	0.59	1			
Phos.	0.10	-0.48	-0.68	-0.78	0.76	0.81	1		
Amm.	-0.25	0.01	-0.24	-0.43	0.48	0.48	0.62	1	
COD	-0.26	-0.05	-0.35	-0.57	0.29	0.56	0.57	0.68	1

b) Jan. 2003 (dry season)

	Temp.	DO	pH	Salinity	Nitrite	Nitrate	Phos.	Amm.	COD
Temp.	1								
DO	-0.92	1							
pH	0.67	-0.62	1						
Salinity	0.77	-0.73	0.78	1					
Nitrite	-0.94	0.87	-0.69	-0.66	1				
Nitrate	-0.41	0.38	-0.49	-0.54	0.31	1			
Phos.	-0.82	0.75	-0.89	-0.89	0.82	0.62	1		
Amm.	-0.73	0.63	-0.72	-0.77	0.71	0.52	0.83	1	
COD	-0.40	0.33	-0.73	-0.67	0.41	0.61	0.75	0.75	1

All correlations are significant at $p < 0.05$.

연안 얽하구 환경에서 수질 특성 조절 요인

연구해역에서 일반수질 지수 및 영양염류의 계절별(홍수기와 갈수기) 거동을 이해하기 위해 일차적으로 인자들 사이의 상관관계를 살펴보았다.

홍수기: 일반적으로 얽하구에서 염분은 담수와의 단순한 희석 효과에 의해 결정되므로 염분과 수질 지수들과의 상관관계는 이들의 변화가 단순한 물리적 희석작용인지, 혹은 하구내에서 첨가 또는 제거되는 생지화학적 작용인지를 이해하는데 유용하다. 여름

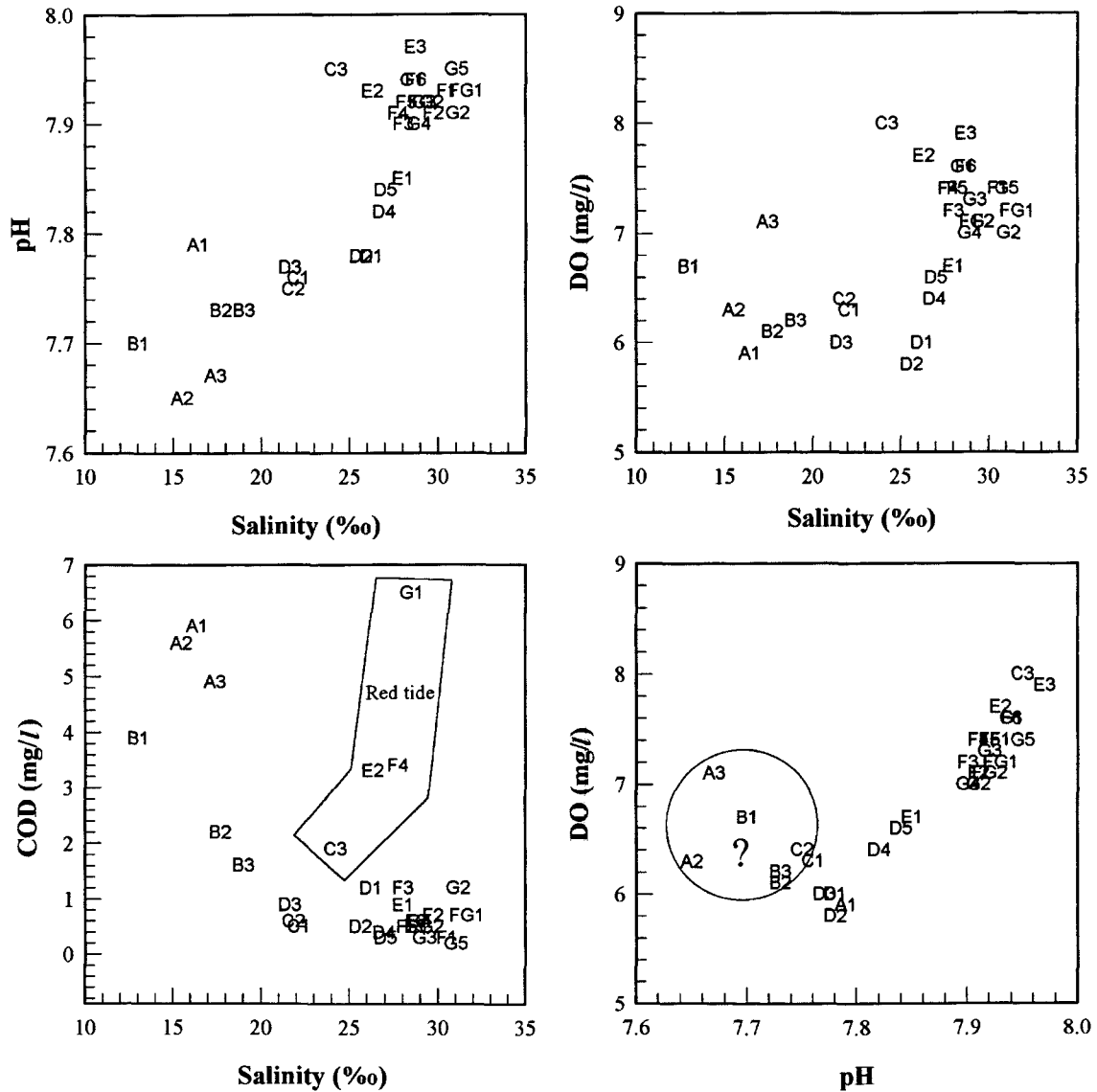


Fig. 5. Correlations between salinity and physiochemical parameters, and DO against pH during the summer flood season.

철 홍수기의 경우 보존적인 염분은 pH와 양호한 상관관계를 보이는 반면, 용존산소와 COD와의 상관관계는 낮다(Table 4a). 그러나 여수해협에 위치한 몇몇 정점을 제외하면, 용존산소량은 pH와 매우 좋은 상관관계를 보이며(Fig. 5), 이는 단순한 물리적 혼합과정 이외에도 유기물을 많이 함유한 담수가 유입되면서 진행되는 지화학적 과정에 의해서 조절된 결과로 사료된다. 즉, 담수에 함유된 유기물 분해에 소비되는 용존산소량은 낮아지고, 그 결과 해수내로 방출되는 CO₂ 용해에 의해 해수의 pH가 낮아지는 것으로 해석되며, 이러한 실험적 결과는 이와 한(2001)이 보고한 바 있다. 더욱이 몇몇 정점에서 관찰되는 적조현상은 용존산소와 pH와의 상관관계를 더욱 증진 시키는 것으로 보인다. 즉, 조류(algae)의 대증식은 많은 양의 CO₂를 해수에서 제거하고, 산소를 방출하여 두 성분은 모두 증가하게 된다. 한편, COD는 염분과 약한 상관관계를 보이나, 몇몇 정점들을 제외하면 매우 좋은 음의 상관관계를

보인다(Fig. 5). 즉, 적조현상이 뚜렷한 G1, E2 및 F4 정점에서 사멸된 식물플랑크톤에 의한 높은 COD를 제외하면, 연구해역에서 여름철 COD의 농도 또한 일차적으로 담수의 혼합에 의해 조절되는 것으로 해석된다. 그러나 정점 B1을 비롯한 염분 16~23 psu 사이의 해역에서 나타나는 COD의 감소현상은 담수와 해수의 물리적 혼합에 따라 침진이 가속화된 입자들의 표면에 함께 흡착되어 침전 되었거나 이동 중에 분해 되어 낮아진 것으로 추정된다. 위에서 제시된 것처럼 여름철 홍수기 동안 영양염의 농도를 변화시킬 수 있는 일차적인 요인은 섬진강에서 유입되는 담수와 농도가 낮은 해수와의 혼합으로 볼 수 있다. 즉, 본 연구에서 영양염류 중 질산염과 인산염은 염분과 양호한 상관관계를 나타내었다(Table 4a). 특히 질산염은 염분과 직선에 가까운 변화를 보이는 것으로 보아, 연구해역의 질산염의 농도와 공간 변화는 담수와 해수의 단순한 혼합에 의해 조절되는 보존적인 성격을 나타낸다(Fig.

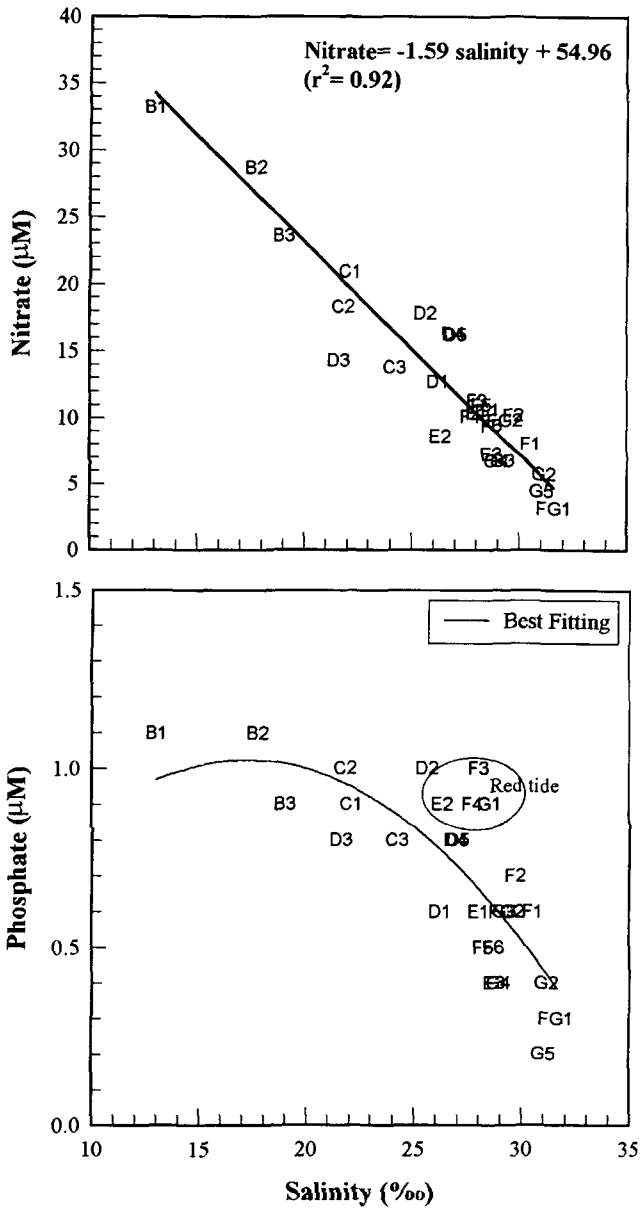


Fig. 6. Correlations of nitrate and phosphate against salinity during the summer flood season.

6). 이러한 물리적인 과정 이외에도 생화학적 첨가와 제거기작, 즉, 하구내에서 담수성 식물플랑크톤이 해수와 접촉함으로써 사멸하고 담수기원 유기물이 염하구내에서 산화하여 질소계 영양염의 pool로 공급되는 질산화과정(Kaplan, 1983), 식물플랑크톤에 의한 소모(Nixon and Pilson, 1983) 그리고 유기물(주로 식물플랑크톤의 생물량)이 퇴적물로 침전 제거되는 과정 등 또한 부가적인 요인으로 제시된다.

인산염의 경우도 일차적으로 보존적인 성향을 보이나, 염분의 증가와 함께 첨가 현상이 나타나며, 더욱이 적조가 발생했던 정점들 주변에서 인산염 첨가현상은 더욱 뚜렷하다(Fig. 6). 일반적으로 염하구내에서 인산염의 주요 첨가 원인은 인산염이 퇴적물에서 용출 되는 것 그리고 부유물질 표면에 흡착된 인산염이 탈착

되는 것 등이 있다(Edmond *et al.*, 1985; Chester, 1990). 담수에 포함된 인산염의 대부분은 입자와 결합된 상태로 이동한 후, 해수와 접촉하면서 탈착되어 하구내의 이차적인 인산염 공급지로 작용한다(Chester, 1990). 본 연구에서도 해수와 담수가 혼합시 부유물에 흡착되었던 인산염이 탈착하는 것이 해수내로의 가장 중요한 첨가기작으로 제시된다. 즉, 본 연구해역은 여름철 홍수기에 많은 담수의 유입으로 인하여 염분의 농도가 10~33 psu까지 변화하는 물리적으로 뚜렷한 염하구 환경을 이루며, 이러한 물리적 현상에 따른 입자들의 침전시 인산염의 탈착이 첨가의 주요 원인으로 해석된다(양, 2000). 한편, 적조발생 주변의 정점들에서 인산염의 첨가가 현저한 원인은 생화학적 첨가현상, 즉 조류의 대번식 후 사멸·분해 됨에 따라 진행되는 유기물 산화 등의 반응에 의한 인산염의 용출 기작이 인산염의 농도를 증가시키는 원인으로 제시된다. 이러한 해석은 이들 정점들에서 높은 COD 농도와 암모늄염 농도 그리고 인산염과 암모늄염 그리고 아질산염 사이의 매우 좋은 상관관계를 감안하면 전체적으로 이해가 가능하다(Table 4a). 암모늄염의 농도도 적조가 발생한 정점들을 제외하면, 질산염과 유사하게 염분과 매우 양호한 반비례 관계를 보인다.

연구해역에서 홍수기 동안 일어나는 해수의 물리·화학적 인자들의 거동 특성과 함량을 조절하는 보다 지배적인 요인을 파악하기 위해서는 결과들을 종합적으로 검토할 필요가 있으며, 본 연구에서는 R-mode 요인분석(factor analysis)을 통해 그러한 접근을 시도하였다. 요인분석 결과, 총 분산의 87%를 설명하는 3개의 요인(factor)을 취하였다(Table 5a). Factor 1은 총 분산의 60%를 설명하는 요인으로 pH, 용존산소, 질산염, 염분, 용존무기질소 등에서 높은 적재값(loadings)을 나타내며, 아질산염과 인산염도 다소 높은 적재값을 갖는다. Factor 1에서 적재값이 높은 성분들 사이에는 염분과 양호한 관련성을 갖는 공통된 특징을 보이며(Table 4a), 그 결과 Factor 1은 섬진강에서 유입되는 담수와 해수의 물리적 혼합요인으로 해석된다. Factor 2는 암모늄염, COD 그리고 인산염에서 적재값이 높은 요인으로 총 분산의 16%를 설명한다. 위에서 설명된 것처럼 이들 사이의 좋은 상관관계는 담수와 해수의 혼합작용 과정에서 일어나는 탈착 및 기타 생지화학적 요인으로 해석된다. 특히 인산염은 Factor 1과 2의 복합적 요인에 의해 조절되는 것으로 나타났다. Factor 3은 수온에 대해서만 높은 적재값을 나타내는 요인으로 총 분산의 11%를 설명한다. 이는 수온의 변수가 독립적인 요인에 의해 조절되고 있음을 시사하며, 공간 분포에서 제시된 것처럼 수온이 남쪽으로 갈수록 점이적으로 증가하나 소리도의 서쪽에서 다시 감소하는 현상 때문으로 해석된다. 이러한 수온의 분포 경향에 대해서는 좀더 자세한 연구가 필요하다.

갈수기: 겨울철 갈수기의 경우 염분은 수온, 용존산소 그리고 pH와 양호한 상관관계를 보인다(Table 4b). 비록 겨울철 염분의 변화 폭이 약 32~33 psu 범위로 작지만 이들 성분들은 일차적으로 담수의 영향에 의해 조절되는 것으로 생각된다. 여름철과 유사하게 겨울철 담수 또한 낮은 수온과 pH 특성을 잘 보여주며, 용존산소는 여름철과 다르게 주로 온도에 의해 조절되는 것으로 보인다. 염분과 영양염류와의 상관관계 또한 양호하다(Table 4b). 영양염류 또한 염분이 증가하면서 전반적으로 감소하는 경향을 보이나, 담수의 영향을 직접 받는 여수해역의 정점들을 제외하면 질산염과 암모늄염은 염분과 뚜렷한 관계를 보이지 않는다(Table

Table 5. Results of factor analysis for the physicochemical data and percentage of variance explained by the individual factor loadings.

a) Aug. 2002 (summer flood season)

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Communality
pH	-0.96	-0.17	0.04	0.95
DO	-0.88	0.16	-0.18	0.83
Nitrate	0.86	0.46	-0.05	0.95
Salinity	-0.84	-0.43	0.06	0.89
DIN	0.82	0.53	-0.04	0.96
Nitrite	0.50	0.48	0.49	0.72
Ammonium	0.09	0.93	-0.05	0.87
COD	0.22	0.81	-0.24	0.77
Phosphate	0.62	0.65	0.31	0.91
Temp.	-0.05	-0.18	0.89	0.83
Cumulative(%)	60.03	76.13	86.78	

b) Jan. 2003 (winter dry season)

Variables	Factor 1	Factor 2	Communality
Temp.	-0.94	-0.29	0.96
Nitrite	0.93	0.24	0.93
DO	0.92	0.21	0.90
Phosphate	0.69	0.68	0.94
Salinity	-0.64	-0.63	0.81
COD	0.17	0.91	0.86
Nitrate	0.12	0.82	0.69
DIN	0.56	0.79	0.94
Ammonium	0.58	0.69	0.80
pH	-0.57	-0.66	0.76
Cumulative(%)	73.33	85.83	

1). 이러한 원인은 갈수기에는 섬진강 담수의 영양염 농도가 낮고, 매우 제한적인 확산 범위 때문으로 해석된다. 겨울철 자료의 요인 분석 결과, 총 분산의 86%를 설명하는 2개의 요인을 취하였다 (Table 5b). Factor 1은 총 분산의 73%를 설명하며, 수온, 아질산염, 용존산소, 인산염 그리고 염분에서 높은 적재값 (loading value) 을 나타냈다. 이러한 적재값이 높은 성분들은 공통적으로 염분과 양호한 상관관계를 갖는다 (Table 4b). 따라서 섬진강으로부터 공급되는 담수와의 희석 효과가 Factor 1의 요인으로 제시된다. 한편, 총 분산의 13%를 설명하는 Factor 2는 COD와 질산염에서 높은 적재값을 나타내며, 암모니움염, pH, 인산염에서도 다소 높은 적재값을 나타낸다. 이는 Factor 2가 해양(염하구)환경에서 일어나는 생지화학적 과정, 즉 갈수기 동안은 담수의 유속이 느려져 이동 및 체류시간이 길어지므로 유기물 분해에 의해 염하구 해수중 인산염, 암모니움염, 아질산염의 농도가 증가하는 요인으로 설명된다 (양 등, 2000).

DIN/DIP 비와 기초생산의 제한인자(제한영양염)

육지와 해양에서 식물플랑크톤 증식에 대한 제한영양염 (limiting nutrient)은 일반적으로 육지에서는 인, 해양에서는 질소로 알려져 있다 (Hecky and Kilham, 1988). 그러나 육지와 해양이 접한 염하구나 내만의 연안환경에서 전체 또는 부분적인 담수와 해수의 혼

합으로 인하여 제한영양염은 시기별 (또는 계절별)로 크게 달라진다 (Graneli, 1987; Fisher et al., 1992). 특히 본 연구에서와 같이 장마기간 동안 대량의 담수가 유입되어 일시적 염하구 환경을 형성하는 경우, 식물플랑크톤 증식의 제한영양염은 특별할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 가장 간단하고, 많이 이용되는 DIN/DIP 비를 이용하여 담수 유입량에 따른 시기별 제한영양염을 판단하고자 한다.

본 연구해역에서 염분의 평균 농도가 33.2 psu로 담수의 유입이 적은 겨울철 갈수기에 DIN/DIP 비는 9.8~15.8 범위 (평균 13.3)로 모든 정점에서 16이하이다 (Table 1). 이러한 DIN/DIP 비는 일반 해수에서의 평균값 (약 16, Redfield ratio) 그리고 쿠로시오 해류의 값 (약 14.5, Wong et al., 1998)과 유사하다. 그러나 유사한 염분 농도를 갖는 남해 연안의 득량만 (평균 7.2), 여자만 (평균 8.5), 가막만 (평균 7.9) 및 광양만 (평균 4.1)보다 2~3배 이상 높다 (이 등, 2001b). 이러한 결과는 위의 비교해역에서 인산염의 농도가 비슷함을 고려할 때, 남해안의 내만역에 비해 겨울철 연구해역에서는 질소가 상대적으로 부화 (excess)되어 있음을 의미한다. 한편 연구해역과 인접한 광양만에서 DIN/DIP 비가 매우 낮은 원인은 만내에 위치한 점오염원에 의한 인의 농도가 크게 증가하였기 때문으로 해석된다. 따라서 DIN/DIP 비에 근거할 때, 남해 연안역은 물론 겨울철 연구해역의 제한영양염은 질소일 것으로 판단된다.

담수량이 많았던 여름철 홍수기의 경우, DIN/DIP 비는 정점 E2와 FG1을 제외하고 16.3~35.9 범위 (평균 23.0)로 겨울철과 비교하여 2배 이상 크게 증가하였다 (Table 1). 특히 섬진강 하구와 가까운 Line A 정점들에서는 그 비가 30 이상으로 높고, 남쪽(외해)으로 갈수록 감소하여 Line F와 G에서는 20 내외이다. 여름철 홍수기 동안 높은 DIN/DIP 비는 인의 농도가 겨울철과 비교하여 크게 증가하지 않았으나, 대조적으로 질소의 농도는 최대 20 μM 이상 크게 증가하였기 때문이다. 이러한 DIN/DIP 비가 쿠로시오 해류 또는 Redfield ratio 보다 크게 높은 것으로 보아, 담수량이 많은 홍수기에는 일시적으로 인이 식물플랑크톤 증식의 제한영양염으로 제시될 수 있다. 이와 같이 계절적 또는 시기적으로 제한영양염이 변화하는 현상은 미국의 체사피크만 (Chesapeake Bay), 중국의 황하 하구 (Huanghe Estuary), 일본의 히로시마만 (Hiroshima Bay) 등에서도 보고된 바 있다 (Harrison et al., 1990; Fisher et al., 1992; Lee et al., 1996). 그러나 연구해역의 DIN/DIP 비는 DIN의 농도에 의해 주도되기 때문에 더욱 정확한 제한영양염의 판단은 생물량 (엽록소의 양)과 영양염류 양과의 평형관계를 고려해야 할 것으로 사료된다.

결 론

연구해역으로 유입되는 섬진강 담수는 낮은 수온과 pH 그리고 높은 COD와 영양염 (주로 질산염) 농도 특성을 보인다. 여름철 홍수기에는 섬진강 하구에서 약 30 km 떨어진 돌산도 해역까지 광활한 연안역 염하구 환경 (염분 20 psu 미만)을 이루는 것으로 밝혀져, 남해 연안역의 물리·화학적 특성이 계절적 또는 시기적으로 크게 차이를 보여준다. 이러한 연안역에 형성된 염하구 환경에서 해수의 물리·화학적 인자들의 공간 분포와 거동 특성은 섬진강에

서 공급되는 담수와 해수의 물리적 혼합, 그리고 운반과정에서 일어나는 탈착 및 기타 생지화학적 요인 등에 의해 잘 설명된다. 또한 DIN/DIP의 비에 근거할 때, 겨울철 갈수기에는 질소가 잠재적인 제한영양염으로 제시되며, 일시적 염하구 환경을 이루는 홍수기에는 인이 제한영양염으로 나타난다. 그러나 연구해역의 DIN/DIP의 비가 주로 DIN의 농도에 의해 조절됨을 고려할 때, 홍수기 동안 나타나는 인의 제한은 일시적일 것으로 보인다. 종합적으로 본 연구해역에서 여름철 홍수기 동안 형성된 염하구 환경의 수질 특성은 일반적인 강 하구 염하구의 환경 특성과 크게 다르지 않으나, 연안 염하구 환경을 더 자세하게 이해하기 위해서는 표층 해수와 함께 수층의 수직구조에 대한 조사가 병행되어야 할 것으로 사료된다. 결론적으로 집중호우 등 몬순(Monsoon)기후 특성을 갖는 우리나라 해역에서는 여름철에 연안역을 따라 연안 염하구 (coastal pseudo-estuary) 환경이 광범위하게 발달할 수 있고, 이러한 일시적 염하구 환경의 발달이 육지-해양간 물질 순환에 상당한 역할을 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문을 세밀히 심사해주신 책임편집위원과 두 분의 심사위원(군산대 양재삼교수님, 부산대 이동섭교수님) 그리고 현장조사와 실내분석에 많은 도움을 주신 노혜진 연구원께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 “소형 무인 탐사선 핵심기술 개발(PE831-03)” 연구 사업의 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- 기상청, 2002. 기상월보 2002.
- 김광식, 1968. 10대강 유역의 물수지. 한국기상학회지, **4**: 1-7.
- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암, 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포 특성. 한국해양학회지 [바다], **3**: 165-169.
- 김학균, 1989. 마산만의 편모조 적조의 발생과 환경특성. 국립수산진흥원 연구보고, **43**: 1-40.
- 권기영, 문창호, 양한섭, 2001a. 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 영양염의 거동. 한수지, **34**: 199-206.
- 권기영, 이평강, 박철, 문창호, 박미옥, 2001b. 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 동-식물플랑크톤의 현종량 및 종조성. 한국해양학회지[바다], **6**: 93-102.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리-화학적 특성. 한국해양학회지[바다], **5**: 16-26.
- 유영두, 정해진, 심재형, 박재연, 이경재, 이원호, 권효근, 배세진, 박종규, 2002. 전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구 1. 1999년도 여름-가을 식물플랑크톤의 시공간적변화. 한국해양학회지[바다], **7**: 129-139.
- 이강현, 한명우, 2001. 퇴적물 내 유기물의 초기 숙성작용에 나타난 유기 질소의 선택적 분해. 한국해양학회지[바다], **2**: 3-70.
- 이동섭, 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국해양학회지[바다], **4**: 371-382.
- 이동섭, 김기현, 1998. 228Ra를 이용한 이상 저염 대마난류의 기원 추적 연구. 한국해양학회지[바다], **3**: 175-182.
- 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤, 2001. *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작과 대책 1. *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생과 소멸의 환경특성. 한국해양학회지[바다], **6**: 259-264.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수, 2001. 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염. 한국해양학회지[바다], **6**: 201-210.
- 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경제, 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지[바다], **5**: 27-36.
- 최현용, 2001. 한국 남해 나로도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계. 한국해양학회지[바다], **6**: 49-62.
- Chester, R., 1990. Marine Geochemistry. Unwin Hyman, London, 689 pp.
- Edmond, J.M., A. Spivack, B.C. Grant, H. Ming-Hui, C. Zexiam, C. Sung, and Z. Xiushau, 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Cont. Shelf Res.*, **4**: 17-36.
- Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman and L. Harding, 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **82**: 51-63.
- Graneli, E., 1987. Nutrient limitation of phytoplankton biomass in a brackish water bay highly influenced by river discharge. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **25**: 555-565.
- Harrison, P.J., M.H. Hu, Y.P. Yang and X. Lu, 1990. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **140**: 79-87.
- Hecky, R.E. and P. Kilham, 1988. Nutrient limitation of Phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. and Oceanogr.*, **33**: 796-822.
- Kaplan, W.A., 1983. Nitrification. In: Nitrogen In Marine Environment, edited by Carpenter E.J. and D.C. Capone, Academic Press, New York, pp. 139-190.
- Kim, T.J., 1992. Sorption behaviour of radium isotopes and nutrient fluxes in the Seomjin estuary of Korea, during high river discharge. MS Thesis, Chungnam National University, 59 pp.
- Kim, S.H., C.B., Song, S.H., Kang, D.B., Yang and Hong, J.S., 1988. The distribution pattern of nutrients at the cultivation ground of laver in Kwangyang Bay. *Ocean Research*, **10**: 1-8.
- Lee, Y.S., T. Seiki, T. Mukai, K. Takimoto and M. Okada, 1996. Limiting nutrients of phytoplankton community in Hiroshima Bay. *Japan. Wat. Res.*, **30**: 1490-1494.
- Lee, Y.S., J.S. Lee, R.H. Jung, S.S. Kim and W.J. Go, K.Y. Kim and J.S. Park, 2001. Limiting Nutrient on Phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *J. Oceanogr. Soc. Korea [The Sea]*, **6**: 201-210.
- Nixon, S.W. and M.E. Pilson, 1983. Nitrogen in Estuaries and Coastal Marine System. In: Nitrogen In Marine Environment, edited by Carpenter E.J. and D.C. Capone, Academic Press, New York, pp. 565-638.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.

- Shim, J.H., Y.K. Shin and W.H. Lee, 1984. On the phytoplankton distribution in the Kwangyang Bay. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **10**: 172–186.
- Solorzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenylhypochlorite method. *Limnol., Oceanogr.*, **14**: 799–801.
- Wang, B.D., G.Y. Wang, G.H. Hong and C.S. Chung, 1999. Features of plane distributions and seasonal variations of dissolved oxygen over the Yellow Sea. *The Yellow Sea*, **5**: 8–13.
- Wong, G.T.F., G.C. Gong, K.K. Liu and S.C. Pai, 1998. Excess nitrate in the East China Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **46**: 411–418.
- Yu, Z., X. Song, W. Huo and B. Zhang, 2001. Blooming of *Skeletonema costatum* in relationship to environmental factors in Jiaozhou Bay, China. *The Yellow Sea*, **7**: 84–89.
-
- 2003년 4월 9일 원고접수
2003년 5월 9일 수정본채택
담당편집위원: 이동섭