

통계분석기법을 이용한 전남 갯벌 해역 수질특성

전수경[†] · 김종기 · 김 윤
전라남도해양바이오연구원

The Evaluation of the Water Quality in Coastal Boundary on Tidal flat

Sue Kyung Jun[†], Chong Ki Kim and Yun Kim
Jeollanamdo Marine-Bio Research institute

요 약

전남 서해 갯벌 연안경계부 수질특성을 파악하기 위하여 5개 해역(무안만, 탄도만, 함평만, 신안지도 및 영광해역)을 대상으로 2008년에서 2009년까지 2년 동안 한 달에 두 번씩 현장조사를 실시하였다. 수온은 1.3~31.1 °C로 연교차가 컸다. 염분은 비교적 32 내외로 균일하였으나 강우가 집중되는 시기에 염분 함량이 20 이하로 저염화가 나타났다. 수온 변화에 따라 용존산소는 하계에 낮고 동계에 높았다. 수소이온농도는 용존산소와 비슷한 분포경향을 보였다. 부유물질의 경우 영광해역에서 100 mg/l 이상으로 높은 함량을 보였다. 화학적 산소요구량은 1 mg/l 내외로 큰 변화가 없었으며, 용존무기질소와 용존무기인은 담수유입이 증가하는 시기에 높은 함량을 보였다. 용존무기질소는 겨울과 초봄에 낮은 반면에 용존 무기인은 월별 변화 없이 균일한 분포를 보이다가 2009년 7월 이후 다소 증가하는 경향을 보였다. 엽록소 a 는 봄철에 10 $\mu\text{g/l}$ 내외로 나타났으며 이후 대부분 비슷한 분포 경향을 보이나 특히 타해역에 비하여 여름철에 영광해역에서 높게 나타났다. 해역별 수질특성을 비교하기 위하여 실시한 주성분분석 결과는 다음과 같이 뚜렷한 특징을 보였다. 무안만과 탄도만에서 제 1 주성분 요인은 담수유입 변동이었으며, 신안지도 해역과 영광해역에서는 수온의 변화로 나타났다. 함평만에서는 담수유입 변동과 수온변화의 영향이 제 1 주성분 요인으로 복합되어 나타났다.

Abstract – To understand characteristics of the water quality on the coastal boundary on tidal flat, field observations between 2008 and 2009 were undertaken twice a month at five coastal areas (Muan bay, Tando bay, Hampyeong bay, Shinan Jido and Yeongkwang coastal areas). Yearly water temperature difference was large with the range between 1.3 °C and 31.1 °C. Salinity was about 32 but was the lower less than 20 for the heavy rainfall season. DO was high in winter and low in summer according to the variation of water temperature. pH represented the variation similar to DO. Suspended solid was averagely high over 100 mg/l in Yeongkwang coastal area, especially. COD did not revealed large variation with the value of about 1 mg/l. DIN and DIP concentration were high when freshwater was highly input in summer. DIN concentration was low for winter and early spring but DIP concentration did not show the seasonal variation with the continuous increase from July 2009 to December 2009. Chlorophyll a appeared high for spring with approximately 10 $\mu\text{g/l}$ and was higher for summer in Yeongkwang coastal area than other sites. The results of principal component analysis conducted to compare the characteristics of water quality observed in study areas showed the distinguishable features as follows. The freshwater input fluctuation appeared as the first factor in Muan and Tando bays, and the change of water temperature was the first factor in Shinan Jido and Yeongkwang coastal areas. The influence mixed with the variation of freshwater outflow and the change of water temperature in Hampyeong bay was to be the first factor.

Keywords: Coastal boundary(연안경계), Principal component analysis(주성분분석), Water quality characteristics(수질특성), Tidal flat(갯벌)

[†]Corresponding author: waterud@hanmail.net

1. 서 론

전남의 갯벌은 1,036 로 전국 갯벌의 40%를 차지하고 있으며, 전남 갯벌 중에도 무안, 신안, 영광지역이 61%를 차지하고 있다(전라남도[2009]). 전남 서해 연안은 무안만, 탄도만, 함평만 등 반폐쇄적인 해역과 황해와 바로 맞닿아있는 개방된 영광해역, 작은 섬들에 둘러 쌓여있는 신안 해역 등 다양한 형태의 갯벌연안이 존재한다. 반폐쇄적인 해역 중 함평만의 경우 반폐쇄된 만임에도 불구하고 퇴적물 이동이 활발한 곳으로 알려져 있어 만 내 퇴적물 분포 및 특성에 관한 정성적인 연구(김과 장[1998]; 류 등[1997]; 임 등[2002]; 류 등[1998]; 류 등[1999]; 장 등[1999]; 조 등[2001])와 만 내 해수 유동에 관한 연구(박과 조[1999]), 표층퇴적물 내 금속원소 특성(윤 등[1999]) 연구가 진행되었다. 무안만은 목포구와 연결이 되있는 만으로 하구연과 방조제 건설에 따라 고극조위 상승과 같은 조석환경 변화가 심하여 오염물질의 확산이나 퇴적물의 이동 등 퇴적환경 변화가 존재(류 등[2009])하며, 만 내 부유물질의 운반양상(류 등[2000])과 표층 퇴적물의 분포 및 퇴적물(류 등[2001]; Ryu *et al.*[2004]) 연구 및 하구로부터의 담수유입에 따른 연안수질의 특성(이 등[2003])에 관한 연구가 진행되었다. 탄도만에서 퇴적물 분포와 부유물질 이동에 관한 연구(류 등[1999])가 진행되었고, 영광해역의 경우 원자력 발전소와 관련한 환경학적인 연구(김과 허[1998]; 임 등[2005]; 이학영[2003]; 황 등[1998]; 조 등[2006]; 은고요나[2000]; 진 등[1996])가 진행되었다. 육지와 바다의 연안역 경계 즉 연안 가장자리는 육상부로부터 물질유입이 1차적으로 이루어지고 조석과 파랑, 바람에 의한 해수유동이 활발한 곳으로 유입된 물질들이 바다로 들어가는 데 첫 관문의 역할을 하고 있다. 이러한 연안역 경계는 인위적인 물질 유입과 함께 해양 물리적인 요소의 영향을 많이 받기 때문에 해역이나 만의 특성을 설명하기 위해서는 각 해역과 만의 연안 가장자리의 환경학적 특성을 파악하는 것이 필요하나, 연안역 경계부에 대한 연구는 각 만이나 해역에 포함되어 연구되어졌을 뿐이다. 따라서 본 연구에서는 육상기원의 물질이 연안해역으로 유입될 때 통과하는 연안경계부의 이화학적 특징과 변동특성을 파악하고 이를 통해 전남 서해 갯벌 연안의 해역특성을 파악함으로써 물질수지 및 해역관리 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

전남 서해 갯벌연안 경계부의 이화학적 해양환경 특성을 파악하기 위하여 16개 지점을 대상으로 2008년 1월부터 2009년 12월까지 평균적으로 월 2회 현장관측과 해수시료를 채취하였다(Fig. 1). 시료채취 시기는 조사당일의 만조를 기준으로 하였고, 표층 해수시료는 수심 0.5m 내외에서 채취하였다. 수온과 염분, DO, pH는 현장에서 YSI-600QS를 이용하여 현장에서 관측하였고, SS, COD, 용존 무기영양염과 Chl-a 분석을 위한 해수 시료를 채수하였다. 채수한 해수 시료는 GF/C 여과지로 여과하여 SS를 측정하였고 COD는 유기물을 분해하고 남은 potassium permanganese oxide의 양을

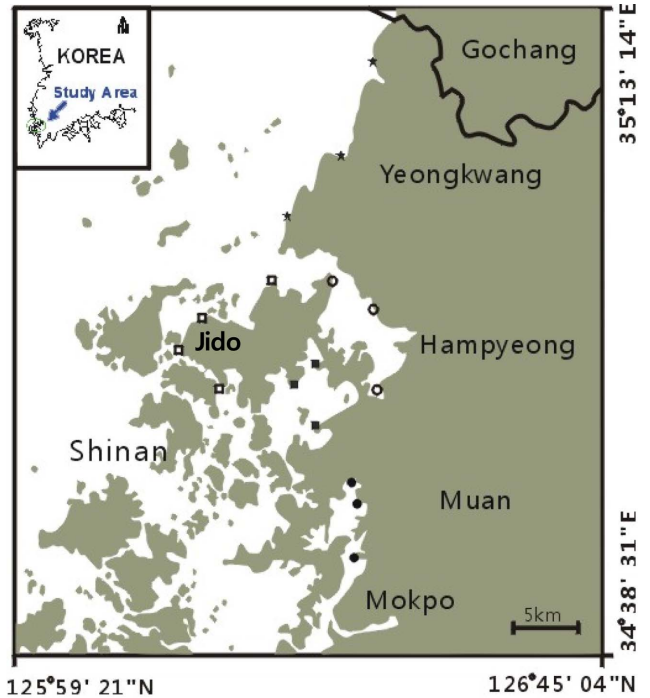


Fig. 1. Location of sampling stations in the west coast of Jeonnam (●: Muan bay, ○: Hambyeong bay, ■: Tando bay, □: Shinan Jido, ★: Yeongkwang).

sodium thiosulfate로 적정, 환산하는 방법을 이용하였다(해양수산부, 2002). 용존무기질소는 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소의 합으로 각 인자는 해양환경공정시험법(해양수산부, 2002)에 준한 영양염 자동분석기(AACS-V, BL)를 이용하여 분석하였고, 용존무기인 또한 용존 무기질소와 같은 방법으로 영양염 자동분석기(AACS-V, BL)를 이용하여 분석하였다. 또한 Chl-a는 해수시료를 GF/C 여과지로 여과한 후 여과지를 유리병에 넣고 90% 아세톤 용액으로 4 °C에서 24시간 추출하여 630, 645, 665, 750 mm 파장에서 흡광도를 측정하여 계산하였다(해양수산부, 2002).

조사지역의 평균기온은 2008년 1월~2009년 12월까지 목포 기상대의 자료를 이용하였고 강수량 역시 기상청의 자동기상시스템(AWS)을 이용하여 동일기간의 무안, 함평, 영광, 신안지도 등 4개 지역 자료를 참고하였다.

또한 갯벌 연안 경계부의 해양환경 특성 파악을 위하여 16개의 조사지점을 지형학적 배경에 따라 5개 해역(무안만, 탄도만, 함평만, 영광해역, 신안지도해역)으로 구분하여 월 평균을 사용하여 통계처리를 실시하였는데, 통계처리는 다변량 해석의 SPSS 10.0 프로그램을 이용하여 상관행렬에 의한 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조사해역의 평균 기온과 강수량

전남 서해연안에서 2008년의 월 평균기온은 -3.6~28.8 °C

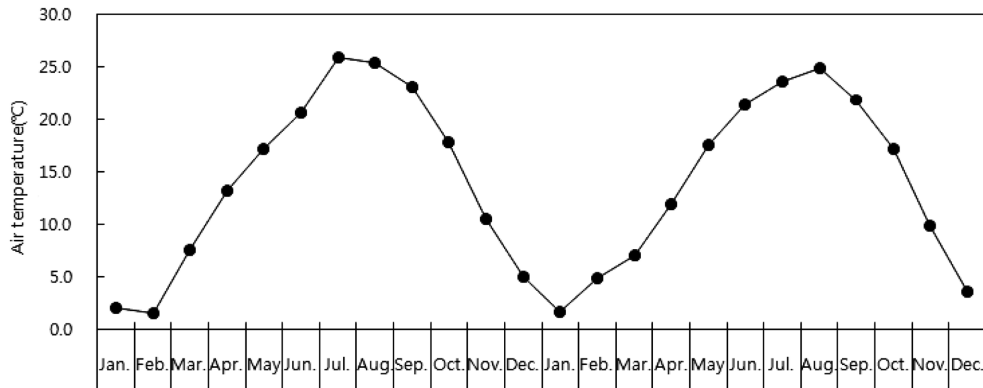


Fig. 2. Monthly variation of mean air temperature in the Mokpo area from January 2008 to December 2009.

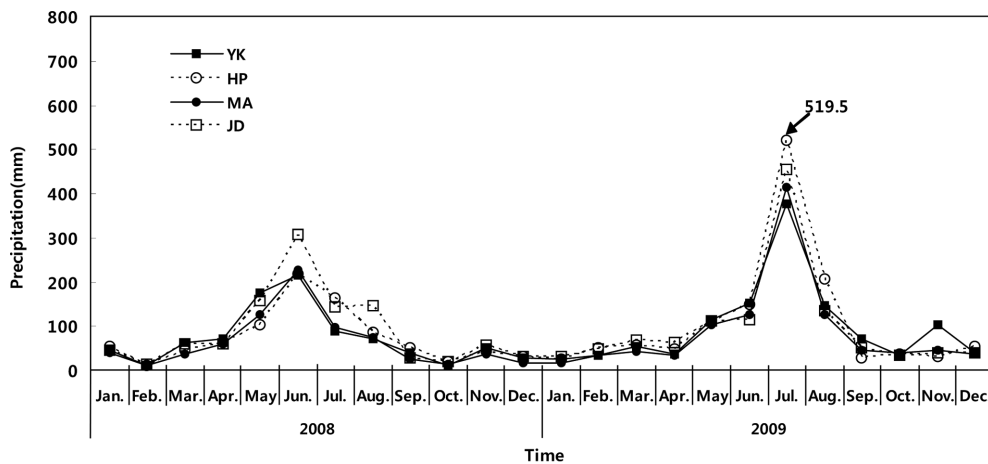


Fig. 3. Monthly variation of precipitation in the west coast, Jeonnam from January 2008 to December 2009 (YK: Yeongkwang, HP: Hampyeong, MA : Muan, JD : Shinan Jido).

(14.2±8.83 °C, 평균±표준편차), 2009년의 월 평균기온은 -4.1~27.6°C(13.8±8.5 °C)으로 2008년에 평균 0.4°C 높은 것으로 나타났다, 전형적인 온대해역의 계절적 특성을 보여주고 있다(Fig. 2).

전남 서해연안 강수량은 Fig. 3과 같다. 조사해역의 2008년 월별 강수량은 11.5~308.5 mm(75.5±67.1 mm)의 범위로 전반적으로 5~6월에 100 mm 이상의 많은 강수량을 보였으며新安지도해역에서는 8월까지 100 mm 이상의 강수량을 보였다. 2009년 월별 강수량은 17.6~519.5 mm(99.8±113.6 mm)으로 조사해역 전체가 5~8월까지 100 mm 이상의 강수가 지속적으로 나타났다. 특히 7월에 400 mm 이상으로 집중되었다. 2008년과 2009년 모두 장마철인 늦봄부터 여름까지 강수가 집중되었다.

3.2 해역별 수질환경

2008년부터 2009년까지 전남 서해연안 경계부 해역별 수질환경을 살펴보면 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

무안만의 수온은 2.1~30.8°C(16.6±8.8°C), 염분은 15.6~32.8(29.9±3.3), DO는 6.17~13.26 mg/l(9.16±2.12 mg/l)으로 나타났다. pH는 7.77~8.43(8.03±0.14), SS는 5~220 mg/l(30±34 mg/l), COD는 0.97~3.48 mg/l(1.69±0.54 mg/l), DIN은 0.064~1.613 mg/l(0.366±

0.313 mg/l), DIP는 0.007~0.094 mg/l(0.034±0.018 mg/l)의 범위로 나타났으며, Chl-a는 0.23~28.20 µg/l(6.36±6.47 µg/l)이었다. 탄도만의 수온은 1.3~29.9°C(15.9±9.0°C), 염분은 24.4~34.3(31.2±2.0), DO는 6.16~13.06 mg/l(9.00±2.06 mg/l)으로 나타났다. pH는 7.87~8.39(8.01±0.11), SS는 3~335 mg/l(25±46 mg/l), COD는 0.88~2.32 mg/l(1.45±0.33 mg/l), DIN은 0.053~1.107 mg/l(0.241±0.196 mg/l), DIP는 0.007~0.069 mg/l(0.027±0.013 mg/l)의 범위였으며, Chl-a는 0.34~21.78 µg/l(3.99±4.52 µg/l)이었다. 함평만의 수온은 2.0~32.0°C(16.7±9.0°C), 염분은 21.2~32.9(31.1±2.2)로 나타났고 DO는 6.31~12.88 mg/l(9.04±1.99 mg/l), pH는 7.73~8.27(8.00±0.12), SS는 8~642 mg/l(67±98 mg/l), COD는 1.14~2.75 mg/l(1.65±0.37 mg/l)의 범위였으며 DIN은 0.146~1.792 mg/l(0.407±0.291 mg/l), DIP는 0.016~0.117 mg/l(0.037±0.017 mg/l), Chl-a는 0.03~45.26 µg/l(6.62±7.08 µg/l)으로 나타났다. 신안지도의 수온은 4.0~27.3°C(15.0±7.7°C), 염분은 30.0~32.8(31.9±0.7), DO는 6.48~11.59 mg/l(8.88±1.81 mg/l)로 나타났다. pH는 7.80~8.25(7.95±0.10), SS는 16~324 mg/l(94±62 mg/l), COD는 0.71~2.45 mg/l(1.27±0.32 mg/l)의 범위였으며 DIN은 0.132~0.466 mg/l(0.241±0.076 mg/l), DIP는 0.018~0.046 mg/l(0.029±0.007 mg/l), Chl-a는 0.27~12.31 µg/

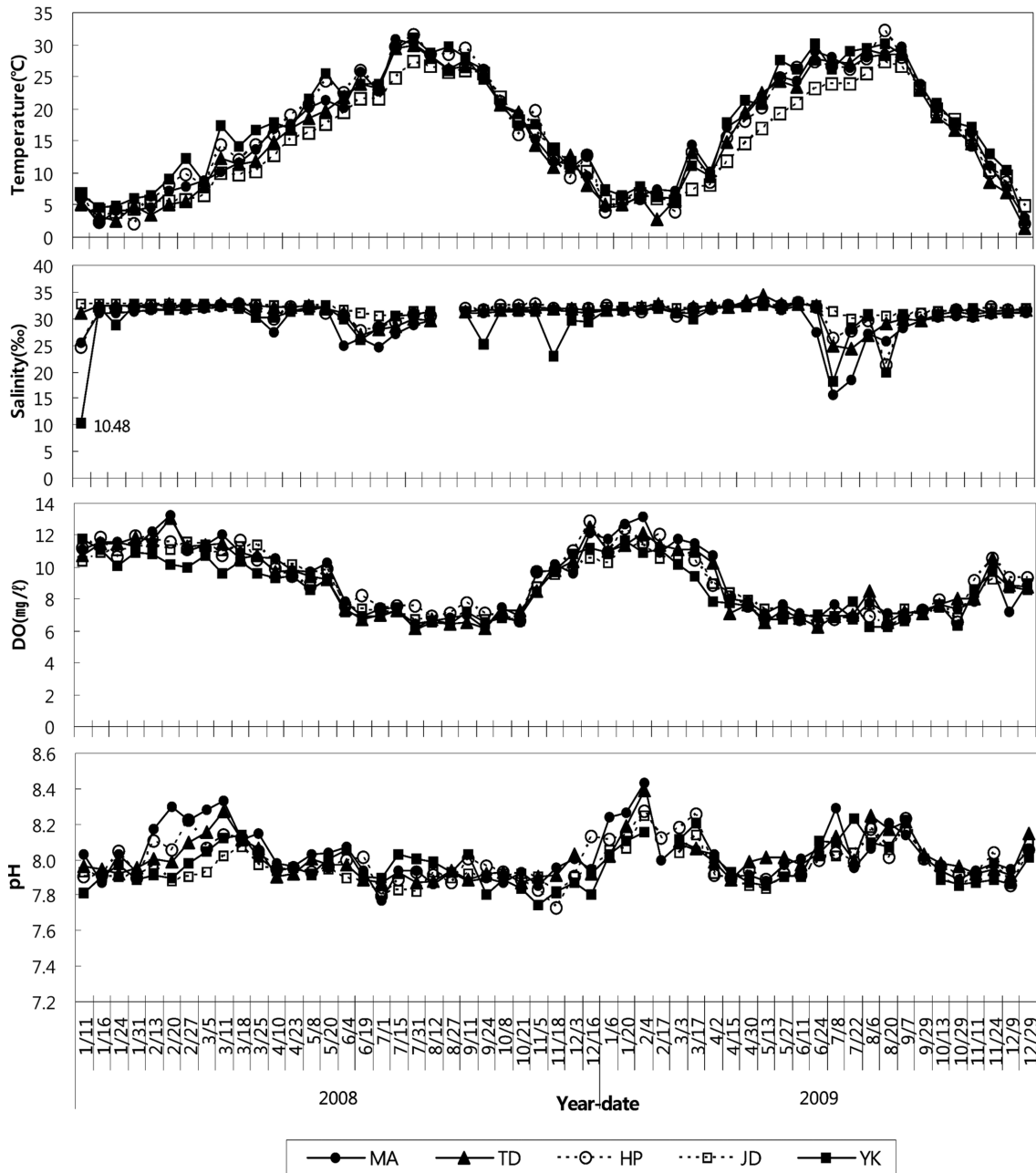


Fig. 4. Variations of Temperature, Salinity, DO and pH in the study areas from January 2008 to December 2009 (MA : Muan bay, TD : Tando bay, HP : Hampyeong bay, JD : Shinan Jido, YK : Yeongkwang).

l($4.35 \pm 3.43 \mu\text{g/l}$)의 범위를 보였다. 영광해역 수온은 $2.6 \sim 31.1^\circ\text{C}$ ($17.5 \pm 8.6^\circ\text{C}$), 염분은 $10.5 \sim 33.1$ (30.0 ± 4.4)의 범위로 나타났다. DO는 $6.10 \sim 11.77 \text{ mg/l}$ ($8.64 \pm 1.76 \text{ mg/l}$), pH는 $7.74 \sim 8.23$ (7.97 ± 0.12), SS는 $14 \sim 1,262 \text{ mg/l}$ ($225 \pm 217 \text{ mg/l}$), COD는 $0.95 \sim 2.93 \text{ mg/l}$ ($1.61 \pm 0.44 \text{ mg/l}$)으로 나타났으며 DIN은 $0.135 \sim 5.557 \text{ mg/l}$ ($0.499 \pm 0.754 \text{ mg/l}$), DIP는 $0.015 \sim 0.092 \text{ mg/l}$ ($0.036 \pm 0.015 \text{ mg/l}$), Chl-a는 $1.24 \sim 30.42 \mu\text{g/l}$ ($11.66 \pm 7.42 \mu\text{g/l}$)였다.

조사해역의 수온은 2008년과 2009년에 영광해역 7°C 내외를 제외하고 대부분 12월~2월에는 5°C 내외로 낮고 7~8월에는 신안

지도해역 25°C 내외를 제외하고 대부분 28°C 내외로 높은 계절 양상을 보였다. 염분은 2008년, 2009년 모두 32 내외로 균일한 분포를 보였으나 강우가 집중되는 시기인 6~8월에 염분이 20 이하로 매우 낮아져 저염화가 나타났고 특히 무안만과 영광해역에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났다. 이는 일부 조사정점이 영산강(무안만)과 외탄강(영광해역)으로부터 담수유입의 영향을 받는 것으로 사료된다. DO는 하계에 7 mg/l 내외로 낮고 동계에 11 mg/l 내외로 높게 나타나 수온과 반대의 분포 경향을 보였다. pH는 2008년에는 2월과 3월에, 2009년에는 1월에 8.2 이상으로 높은 분

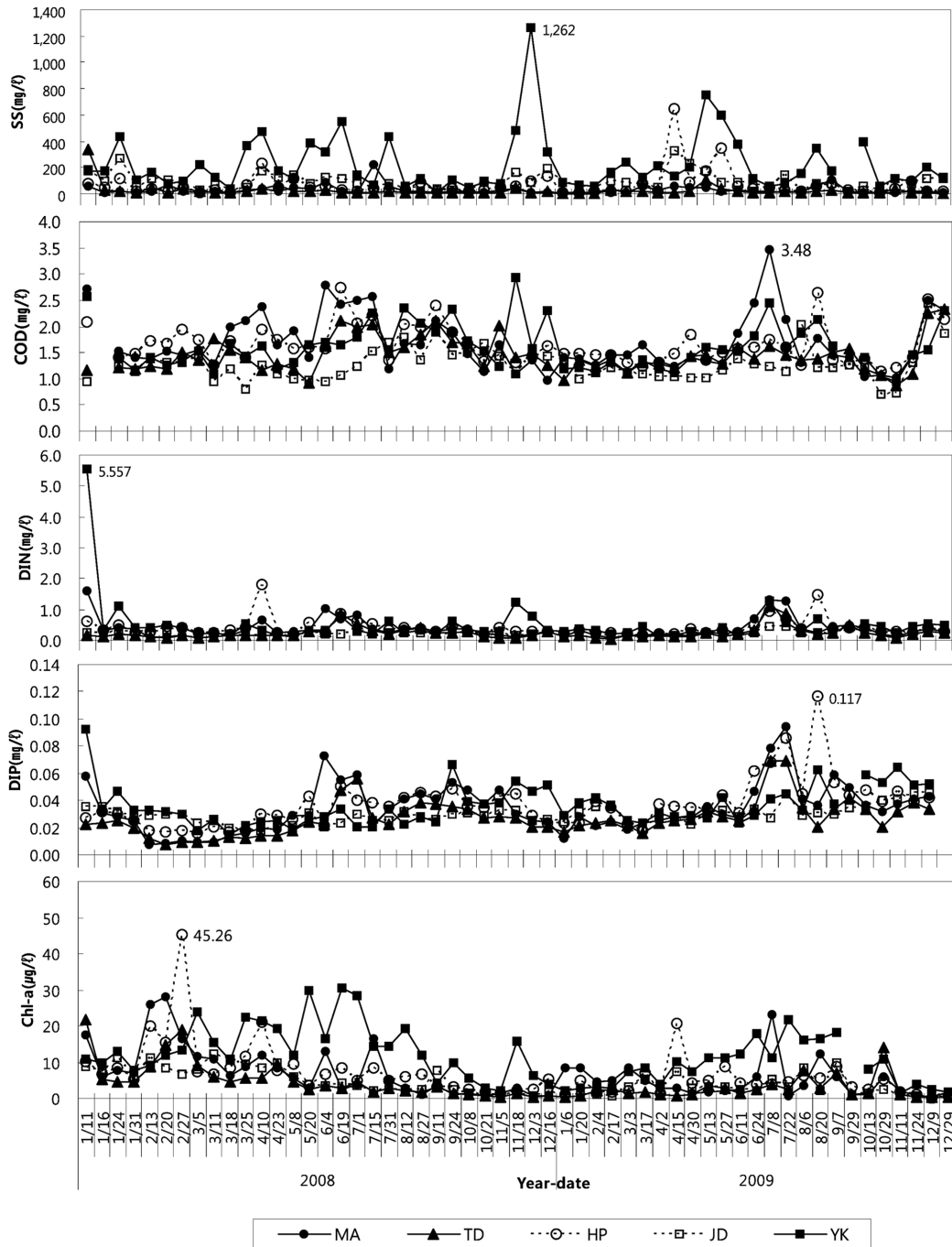


Fig. 5. Variations of SS, COD, DIN, DIP and Chl-a concentration in the study areas from January 2008 to December 2009.

포를 보였고 그 외에는 7.9~8.0 내외로 유사하였으며, 분포경향이 DO와 비슷하여 DO 증가에 따른 pH 증가로 사료된다. SS의 경우 영광해역에서 2008년과 2009년에 대부분 월별 농도가 100 mg/l 이상으로 높게 나타났으며, 특히 2008년 12월 3일에는 1,262 mg/l로 가장 높게 나타났다. 이는 영광해역이 다른 조사해역과 달리 황해와 직접 맞닿아 있어 계절풍을 직접 받았기 때문에 수심이 대체로 낮은 연안경계부에서 저층교란으로 재부유 된 것으로 보이며(김 등[2009]), 신안지도해역과 함평만에서도 가을철을 제외한

나머지 조사일에서 100 mg/l 이상으로 높았고 이는 드넓게 펼쳐진 갯벌의 영향이 어느 정도 작용했으리라 사료된다. COD는 2008년 6~7월에 무안만, 탄도만, 함평만에서 2 mg/l 이상으로 높은 함량을 보였고 2009년에는 무안만에서 6~7월에, 그리고 무안만을 포함한 대부분 해역에서 겨울철에 2 mg/l 이상으로 높은 농도를 보였다. 특히 2009년 7월 8일에 무안만에서는 3 mg/l 이상의 가장 높은 COD 농도를 보였으며, 그 외에는 큰 변화가 없었다. 여름 강수가 유입되는 시기에 높은 COD 농도는 담수로부터 유기물이

유입되었기 때문에 사료된다. DIN와 DIP는 신안지도해역을 제외하고 6월 7월 담수유입이 증가하는 고수온기에 DIN 1.0 mg/l~0.6 mg/l 범위, DIP 0.5 mg/l~0.110 mg/l의 범위로 높은 분포를 보였다. 간헐적으로 담수가 유입이 됐던 영광해역의 2008년 1월에 DIN 5 mg/l 이상으로 가장 높은 분포를 보였다. 또한 DIN은 11월, 12월, 2월, 3월에 농도가 낮은 반면 DIP는 월별 변화 없이 균일한

분포를 보이다가 2009년 7월 이후 계속 증가하는 경향을 보여, 해역 내 생물성장에 있어 DIN이 그 시기에 제한인자로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. Chl-a는 2008년에는 2~4월에 10 µg/l내외로 높았으며 대부분 비슷한 분포경향을 보였으나 영광해역에서는 전반적으로 타 해역에 비해 높았다. 특히 여름철에 높아 해역의 특성이 다름을 보여주고 있었다.

Table 1. Correlation matrix between analytical parameters of surface water in the study areas

	Temperature	Salinity	DO	pH	SS	COD	DIN	DIP	Chl.-a
MA	Salinity	-0.496							
	DO	-0.847	0.411						
	pH	-0.401	-0.074	0.613					
	SS	0.395	-0.189	-0.218	-0.114				
	COD	0.301	-0.670	-0.339	0.025	0.177			
	DIN	0.458	-0.894	-0.440	-0.055	0.134	0.774		
	DIP	0.592	-0.777	-0.717	-0.283	0.103	0.582	0.818	
	Chl-a	-0.190	-0.301	0.417	0.588	0.193	0.254	0.211	-0.198
	Precipitation	0.513	-0.892	-0.394	0.087	0.167	0.700	0.872	0.747
TD	Salinity	-0.549							
	DO	-0.889	0.445						
	pH	-0.252	-0.031	0.392					
	SS	-0.173	0.252	0.184	-0.127				
	COD	0.256	-0.263	-0.453	-0.196	-0.268			
	DIN	0.569	-0.871	-0.521	-0.080	-0.160	0.344		
	DIP	0.569	-0.768	-0.671	-0.121	-0.172	0.382	0.834	
	Chl-a	-0.150	0.053	0.291	0.073	0.455	-0.257	-0.074	-0.373
	Precipitation	0.523	-0.762	-0.437	0.017	-0.028	0.146	0.900	0.728
HP	Salinity	-0.480							
	DO	-0.860	0.387						
	pH	-0.350	-0.137	0.433					
	SS	0.044	0.226	-0.106	-0.325				
	COD	0.271	-0.354	-0.207	-0.160	-0.168			
	DIN	0.431	-0.723	-0.285	-0.056	-0.020	0.443		
	DIP	0.641	-0.730	-0.678	-0.170	-0.102	0.208	0.533	
	Chl-a	-0.079	0.056	0.201	0.168	0.205	0.152	0.265	-0.353
	Precipitation	0.514	-0.720	-0.453	-0.040	-0.062	0.260	0.588	0.671
JD	Salinity	-0.711							
	DO	-0.898	0.643						
	pH	-0.216	-0.087	0.297					
	SS	-0.420	0.414	0.284	-0.305				
	COD	0.201	-0.278	-0.280	0.014	-0.263			
	DIN	0.225	-0.440	-0.262	0.038	-0.238	0.308		
	DIP	-0.039	-0.153	-0.223	0.087	-0.064	0.296	0.468	
	Chl-a	-0.100	0.245	0.337	0.010	0.061	-0.234	0.034	-0.499
	Precipitation	0.460	-0.469	-0.405	-0.008	0.071	-0.160	0.451	-0.075
YK	Salinity	-0.231							
	DO	-0.861	0.129						
	pH	0.018	-0.135	0.071					
	SS	0.048	0.013	0.046	-0.353				
	COD	0.503	-0.585	-0.406	-0.192	0.119			
	DIN	-0.251	-0.687	0.254	-0.161	0.037	0.296		
	DIP	-0.210	-0.396	0.045	-0.371	0.027	0.183	0.464	
	Chl-a	0.602	-0.224	-0.363	0.190	0.171	0.216	-0.007	-0.565
	Precipitation	0.570	-0.529	-0.394	0.388	0.041	0.284	0.135	-0.087

3.3 연안 경계부 수질분석항목간의 상관관계

해역별 연안경계부의 환경학적 특성을 파악하기 위하여 SPSS 를 이용한 통계처리를 실시하였다. 해역별 연안경계부 정점의 분석항목별 상관분석결과는 Table 1과 같다. 무안만에서 항목들간의 상관관계를 살펴보면 수온은 염분 및 DO와 -0.496, -0.847로 음의 상관성을, DIP은 강수량과 0.747로 높은 양의 상관관계를 보였고 염분은 COD, DIN, DIP, 강수량과 각각 -0.670, -0.894, -0.777, -0.892로 높은 음의 상관관계를 보였다. DO는 pH와 0.613로 양의 상관관계를, DIP와 -0.717로 음의 상관성을 보였고 pH는 Chl-a와 0.588로 양의 상관관계를 보였다. 그리고 COD와 DIN, DIP, 강수량은 서로 양의 상관성을 보였다. 이는 고수온기에 낮은 염분과 많은 강수량, 그리고 높은 강수량으로 인하여 유기물 관련 인자(COD, DIN, DIP)가 증가하는 것으로 보였고, Chl-a 농도의 증가에 따라 pH가 증가하여 하구나 연안해역에서 담수유입 정도와 생물생산에 따라 서로 다른 환경 특성을 보였다(Kim *et al.*[1988]; Moon[1990]). 탄도만과 함평만의 경우 무안만과 비슷한 경향을 보였으나 COD와 Chl-a, SS, pH가 어떠한 분석항목과 유의한 상관성을 보이지 않은 특징을 보였고, 신안지도해역과 영광해역은 타해역과 달리 분석항목들 간의 상관성이 낮아 신안지도해역에서는 수온이 염분, DO와 -0.711, -0.898로 높은 음의 상관성을, 염분이 DO와 0.643의 양의 상관성을, DIP가 Chl-a와 -0.499의 음의 유의한 상관관계를 보였다. 영광해역에서는 수온이 DO와 -0.861로 음의 상관성을, COD, Chl-a, 강수량과는 각각 0.503, 0.602, 0.570로 유의한 양의 상관관계를 보였고 염분은 COD, DIP, 강수량과 각각 -0.585, -0.687, -0.529로 유의한 음의 상관성을, DIP가 Chl-a와 -0.565로 음의 상관관계를 보였다. 또한 Chl-a와 강수량이 0.577의 양의 상관관계를 보여 다른 해역과 달리 고수온이 되면서 강수량이 증가하고 Chl-a가 증가하는 경향을 보이는 것으로 보아 다른 해역과 달리 영광해역에서는 담수유입에 따라 Chl-a가 해역 내에서 영향을 크게 받는 것으로 보인다.

3.4 주성분 분석에 의한 연안 경계부 해역별 수질환경특성

해역별 연안경계부의 수질환경특성에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 10개의 항목에 대해 R-mode 요인분석을 실시하였으며, 요인 수는 고유치(eigen value) 기준으로 판단하였고(Table 2), 최초 인자부하량을 분석한 결과로부터 요인 적재량이 어떤 요인에 높게 적재되어 있는지의 여부를 판단하기 위하여 Varimax법으로 회전시켜 요인과 수질변수와의 관계를 설명할 수 있게 나타내었다(Table 3). 그 결과 무안만은 고유값 1 이상으로 총 분산의 84.4%를 설명하는 3개의 Factor, 탄도만은 총 분산의 76.2%를 설명하는 3개의 Factor, 함평만 역시 총 분산의 72.9%를 설명하는 3개의 Factor, 신안지도해역은 총 분산의 77.7%를 설명하는 4개의 Factor, 영광해역은 총 분산의 83.7%를 설명하는 4개의 Factor를 취하였다.

무안만의 경우 요인 1은 COD, DIN, DIP, 강수량이 양의 인자부하량으로, 염분이 음의 인자부하량으로 높게 적재되어 있는데 이들 항목간의 공통성을 살펴보면 담수유입에 따른 유기물과 영양염 관련인자 증가 및 해수와의 물리적 혼합으로 나타나는 염분 변화로 설명되는 요인으로 담수유입과 관련된 외부적 요인에 주로 기인되는 요인으로 전체 45%의 수질특성을 설명할 수 있었고, 요인 2는 수온과 음의 인자부하량, DO, pH, Chl.-a와는 양의 인자부하량으로 높게 적재되어 있으며 이는 수온에 따른 DO의 변화와 관련성인 높은 자연적 요인에 기인되는 인자로 볼 수 있으나 pH와 Chl-a가 함께 적재되어 있어 내부 생산과 관련된 요인이 함께 복합적으로 작용하는 것으로 해석될 수 있다.

탄도만은 요인 1에 수온, DIN, DIP, 강수량이 양의 인자부하량으로, 염분이 음의 인자부하량으로 높게 적재되어 있으며 이는 고수온기 강수량이 많은 시기에 해수와의 혼합에 따른 염분변화와 담수유입으로 인한 영양염 증가로 설명되는 요인으로 무안만의 제 1요인과 같은 담수유입과 관련된 외부요인으로 설명될 수 있으며 요인 1로 전체 39.5%의 수질특성을 설명할 수 있었다. 요인 2는 수온과 음의 인자부하량, 용존산소, pH와 양의 인자부하량으로 높

Table 2. Eigenvalues, variance and cumulative variance of analytical seawater factors

	Principal Component	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
MA	Eigenvalue	4.5	2.6	1.3	
	Variance(%)	45.0	26.0	13.4	
	Cumulative Variance(%)	45.0	71.0	84.4	
TD	Eigenvalue	4.0	1.9	1.8	
	Variance(%)	39.5	18.7	17.9	
	Cumulative Variance(%)	39.5	58.2	76.2	
HP	Eigenvalue	4.0	1.8	1.5	
	Variance(%)	39.8	18.2	14.9	
	Cumulative Variance(%)	39.8	58.0	72.9	
JD	Eigenvalue	2.8	1.9	1.6	1.4
	Variance(%)	28.3	18.8	16.0	14.5
	Cumulative Variance(%)	28.3	47.1	63.1	77.7
YK	Eigenvalue	2.5	2.4	2.1	1.4
	Variance(%)	24.8	23.9	21.1	13.8
	Cumulative Variance(%)	24.8	48.7	69.8	83.7

Table 3. The Varimax-rotated R-mode factor pattern

		Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Communality
MA	Temperature	0.47	-0.59	0.48		0.80
	Salinity	-0.94	-0.03	-0.14		0.90
	DO	-0.44	0.80	-0.24		0.90
	pH	0.07	0.85	-0.10		0.74
	SS	0.06	-0.02	0.95		0.91
	COD	0.81	0.07	0.10		0.67
	DIN	0.96	-0.05	0.05		0.92
	DIP	0.83	-0.45	-0.01		0.89
	Chl.-a	0.24	0.82	0.31		0.82
	Rainfall	0.93	0.01	0.11		0.88
TD	Temperature	0.60	-0.58	-0.14		0.71
	Salinity	-0.92	0.00	0.12		0.85
	DO	-0.50	0.73	0.28		0.86
	pH	0.10	0.85	-0.10		0.74
	SS	-0.11	-0.15	0.83		0.73
	COD	0.20	-0.40	-0.48		0.44
	DIN	0.95	-0.13	-0.07		0.93
	DIP	0.82	-0.26	-0.28		0.83
	Chl.-a	-0.01	0.14	0.81		0.68
	Rainfall	0.93	-0.03	0.06		0.86
HP	Temperature	0.70	0.50	-0.15		0.77
	Salinity	-0.90	0.22	0.00		0.86
	DO	-0.61	-0.60	0.30		0.82
	pH	-0.05	-0.82	0.11		0.69
	SS	-0.21	0.68	0.32		0.61
	COD	0.50	0.03	0.37		0.39
	DIN	0.80	-0.01	0.41		0.81
	DIP	0.83	0.15	-0.37		0.85
	Chl.-a	-0.05	-0.01	0.90		0.82
	Rainfall	0.82	0.00	-0.05		0.68
JD	Temperature	-0.96	-0.02	0.13	0.01	0.95
	Salinity	0.73	-0.15	-0.39	-0.25	0.77
	DO	0.89	-0.28	-0.15	0.16	0.91
	pH	0.29	-0.04	0.16	0.78	0.71
	SS	0.46	-0.10	0.10	-0.76	0.81
	COD	-0.25	0.59	-0.07	0.30	0.50
	DIN	-0.14	0.27	0.82	0.20	0.80
	DIP	0.12	0.84	0.35	0.03	0.85
	Chl.-a	0.17	-0.75	0.09	0.14	0.62
	Rainfall	-0.40	-0.28	0.76	-0.18	0.84
YK	Temperature	0.91	0.00	0.35	0.03	0.95
	Salinity	-0.20	-0.93	-0.14	0.10	0.93
	DO	-0.94	0.07	-0.07	0.05	0.90
	pH	-0.17	0.01	0.57	-0.69	0.83
	SS	-0.05	0.04	0.17	0.89	0.82
	COD	0.60	0.53	-0.03	0.19	0.68
	DIN	-0.25	0.87	-0.09	0.12	0.84
	DIP	0.02	0.55	-0.72	0.03	0.81
	Chl.-a	0.34	0.07	0.83	0.19	0.85
	Rainfall	0.39	0.43	0.63	-0.16	0.76

계 적재 되어 있는데 이들 공통점을 살펴보면 앞서 살펴본 무안만의 요인 2와 같은 자연적 요인에 기인되는 인자로 볼 수 있으며, 요인 3은 SS와 Chl-a가 양의 인자부하량으로 높게 적재되었는데 Table 2의 상관성 관계에서도 비교적 유의하게 나타나는 것으로 보아 퇴적물 재부유에 따른 갯벌 미세조류가 부유 된 것으로 사료된다.

함평만은 요인 1에 수온, COD, DIN, DIP, 강수량이 양의 인자부하량으로, 염분과 DO가 음의 인자부하량으로 높게 적재되었는데 이들 항목간의 상관성을 살펴보면 무안만과 탄도만의 제 1요인과 같은 요인으로 해석 될 수 있으나 이들 해석과 달리 DO가 함께 적재되어 있어 수온과 관련성이 있는 자연적 요인도 복합적으로 작용된 것으로 볼 수 있으며 요인 1로 전체 39.8%의 수질특성을 해석할 수 있었다. 요인 2에는 수온과 SS가 양의 인자부하량으로, DO와 pH가 음의 인자부하량으로 높게 적재되어 있는데 수온과 관련하여 DO의 변화 및 pH의 변화 등 자연적인 요인으로 설명할 수 있고, SS가 어느 정도 관계가 있는 것으로 보이나 Table 2에서 뚜렷한 상관성이 없었다. 요인 3에는 Chl-a가 높은 양의 인자부하량으로 적재되어 있고 다른 항목과 뚜렷한 상관성은 없었지만 기초생산과 관련된 인자로 판단된다.

신안지도해역에서는 요인 1에 수온이 음의 인자부하량으로, 염분과 DO가 양의 인자부하량으로 높게 적재되어 있는데 이는 수온과 관련된 DO 변화와 관련이 높은 자연적인 요인에 기인되는 인자로 전체 28.3%의 수질특성을 해석할 수 있었고, 요인 2에서는 COD와 DIP가 양의 인자부하량, Chl-a가 음의 인자부하량으로 높게 적재되어 있어 조류성장에 있어 필수 인자인 DIP의 변화가 기초생산을 의미하는 Chl-a와 유의한 상관성을 보이는 것으로 보아(Table 1) 해역 내 내부생산과 관련하여 영양염 흡수, 동화 요인으로 해석된다(노 등[2010]). 요인 3에서는 DIN과 강수량이 높은 양의 인자부하량으로 적재되어 있어 담수유입과 관련한 외부적인 요인에 기인되는 것으로 보이며, 요인 4에서는 pH와 SS가 높게 적재되어 있는데 Table 2의 상관관계에서 뚜렷한 관련성이 없었다.

영광해역에서는 요인 1에서 수온이 COD와 양의 인자부하량으로, DO와 음의 인자부하량으로 높게 적재되었는데 이는 신안지도해역과 같이 수온과 관련성 있는 자연적인 요인으로 전체 24.8%의 수질특성을 설명할 수 있었다. 요인 2는 염분이 높은 음의 인자부하량과 COD, DIN, DIP의 높은 양의 인자부하량으로 적재되어 있는데 이는 부영양화와 관련성이 있는 인자로 앞서 Table 2에서 강수량과 유의한 상관성이 존재하는 것으로 보아 담수유입과 관련된 외부적인 요인으로 볼 수 있다. 요인 3에서 pH, Chl-a, 강수량이 양의 인자부하량으로, DIP가 음의 인자부하량으로 높게 적재되어 있어 담수유입이 기초생산을 의미하는 Chl-a, 즉 조류의 성장과 관련되어 있는 DIP와 관련이 있으며 조류성장으로 pH가 증가하는 것으로 나타나 해역 내 내부생산과 관련된 생물학적 요인에 비중이 더 있는 것으로 해석될 수 있다. 요인 4는 신안지도해역과 같이 pH와 SS가 적재되었으나 Table 2에서 이들 간의 뚜렷한 상관성은 없었다.

이상의 결과로 전남 서해 갯벌 연안경계부의 해역별 특성은 무안만, 탄도만, 함평만에서는 3개의 요인, 신안지도해역과 영광해역에서는 4개의 요인으로 해석할 수 있었으며, 대부분 요인들은 담수유입과 관련된 외부적 요인과 수온과 관련한 자연적인 요인, 영양염 흡수에 따른 조류성장 등의 생물학적 요인 등이 있었다. 그러나 연안경계부의 해역별 특성에 대한 제 1요인은 무안만과 탄도만에서는 담수유입과 관련된 외부요인이었으나 함평만에서는 외부요인과 더불어 수온과 관련된 자연적인 요인이 복합적으로 작용하였고, 신안지도해역과 영광해역에서는 수온과 관련된 자연적인 요인으로 해역별 다른 특성을 보여, 함평만이 무안만과 탄도만, 신안지도해역과 영광해역의 접이적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

연안해역이 담수유입에 의해 크게 지배되는 구조인 무안만과 탄도만은 여수 엑스포 해역(노 등[2010])과 목포, 완도 등 남서해역(조와 최[2005])에서와 같은 결과를 보여주고 있었으며 금강하구 장기관측(정 등[2005])과 하계 금강하구 주변해역(권 등[2000])에서도 같은 결과로 나타났다. 이는 여름철 집중강우로 인한 만주변 소규모 방조제와 영산강 하구를 통하여 들어오는 담수로 인하여 저염분화 및 고농도의 영양염 유입으로 만 내 부영양화를 야기시킬 수도 있을 것으로 보인다.

갯벌표층은 주로 태양복사에너지에 의한 지온의 상승에 기인한 열저장효과가 우세한데, 이러한 열은 만조시 갯벌표층을 덮고 있는 해수로 이동된다는 연구(나 등[2000])와 기존의 영광 백수조간대에서의 열수지 연구(김태완[2005])에서도 간조시 갯벌의 높은 지온은 만조시 해수로 이동되어 큰 수온변동으로 나타나 해역의 물리-생물학적인 환경에 큰 영향을 줄 것으로 보인다.

4. 결 론

전남 갯벌 연안경계부 수질특성과 해역별 특성을 파악하기 위하여 2008년에서 2009년까지 2년간 지형학적 배경에 따라 5개 해역(무안만, 탄도만, 함평만, 신안지도해역, 영광해역)으로 구분하여 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 조사해역의 강수량은 11.5~519.5 mm의 범위로부터 여름까지 강우가 집중되었는데 2008년에는 전반적으로 5~6월에 100 mm 이상의 높은 강우량을 보였고, 2009년에는 5~8월까지 100 mm 이상의 강우가 지속적으로 나타났으며, 특히 7월에 400 mm 이상으로 집중되었다.

(2) 수온은 12~2월에 영광해역 7°C 내외를 제외하고 대부분 5°C 내외로 낮고 7~8월에는 신안지도해역 25°C 내외를 제외하고 대부분 28°C 내외로 높은 계절양상을 보였다. 염분은 32 내외로 균일하였으나 강우가 집중되는 시기에 20 이하로 매우 낮아져 저염분화가 나타났는데, 특히 무안만과 영광해역의 특정지점에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났다. DO는 수온의 분포와 다르게 하계에 낮고 동계에 높은 경향을 보였으며 pH는 분포경향이 DO와 비슷하여 DO 증가에 따른 pH 증가로 사료된다.

(3) SS의 경우 영광해역에서 대부분 월별 농도가 100 mg/l 이상으

로 높은 분포를 보였는데 특히 2008년 12월 3일에는 1,262 mg/l로 가장 높게 나타났다. COD는 몇몇 해역에서 여름철에 2 mg/l 이상으로 높은 농도를 보였고 그 외에는 1 mg/l 내외로 큰 변화가 없었다. DIN과 DIP는 신안지도해역을 제외하고 담수유입이 증가하는 시기에 높은 경향을 보였다. DIN은 겨울과 초봄에 농도가 낮은 반면, DIP는 월별 변화 없이 균일한 분포를 보이다가 2009년 7월 이후 계속 증가하는 경향을 보여, 해역 내 생물 성장에 있어 DIN이 그 시기에 제한인자로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. Chl-a는 봄철에 10 mg/l 내외였으며 이 후 대부분 비슷한 분포경향을 보였다. 영광해역에서 전반적으로 타 해역에 비해 높았으나 특히 여름철에 두드러진 특징을 나타내었다.

(4) 해역별 수질특성을 파악하기 위하여 실시한 주성분분석 결과 3~4개의 요인이 추출되었고 이들은 전체 수질특성의 72.9~84.4%를 설명할 수 있었다. 이 중 제 1 요인은 전체 수질특성의 24.8~45.0%를 차지하는데 무안만과 탄도만에서는 담수유입변동, 신안지도해역과 영광해역에서는 수온변화가, 함평만에서는 담수유입변동과 수온변화가 복합적으로 나타났다.

후 기

이 논문은 수산특정연구과제 “폐류양식장의 생산성향상 및 다목적 이용을 위한 구조개선 연구(No. F20926709H220000110)”에 의해 수행된 결과입니다.

참고문헌

- [1] Kim, S.H., Song, C.B., Kang, S.H. and Yang, D.B., 1988, “The distribution pattern of nutrients at the cultivation ground of laver in Kwangyang Bay, 1986”, *Ocean Res. Kor.*, Vol. 10, 1-8.
- [2] Moon, C.H., 1990, “Studies on the Phytoplankton and Nutrients in the Yeosu Haeman”, *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 22, 408-414.
- [3] Ryu, S.O., H.J. Lee and J.H. Chang, 2004, “Seasonal cycle of sedimentary process on mesotidal flats in the semienclosed Muan Bay”, southern west coast of Korea: culminating summertime erosion. *Continental Shelf Reserach*, Vol. 24, No. 1, 137-147.
- [4] 권정노, 김종구, 유선재, 2000, “하계 금강하구 주변해역의 수질특성과 수질변동 요인분석”, *한국해양환경공학회지*, Vol. 3, No. 4, 3-22.
- [5] 김동선, 최상화, 김경희, 김철호, 2009, “동중국해 북부해역에서 부유물질과 입자성유기탄소의 분포 특성 및 연간변화”, *Ocean and Polar Research*, Vol. 31, No. 2, 219-229.
- [6] 김여상, 장진호, 1998, “한국 남서해안 함평만 조간대의 퇴적작용과 형성과정”, *한국지구과학회지*, Vol. 19, No. 6, 664-674.
- [7] 김영환, 허성희, 1998, “서해안 영광원자력발전소 주변 해조군집의 종조성과 생물량”, *한국수산학회지*, Vol. 31, No. 2, 186-194.
- [8] 김정년, 최정화, 임양재, 최광호, 마채우, 2005, “서해 함평만 십각 갑각류의 종조성과 계절변동”, *한국수산학회지*, Vol. 38,

- No. 1, 20-28.
- [9] 김태완, 2005, “한국 남서해안 백수 조간대의 열수지에 관한 연구”, 전남대학교 석사학위논문.
- [10] 나정열, 유승협, 서장원, 2000, “서해 제주도 해역의 간조시 갯벌 퇴적층내 지온 및 열수지의 계절변화”, 한국해양학회지 바다, vol. 5, No. 1, 1-9.
- [11] 노일현, 오석진, 박종식, 안영규, 윤양호, 2010, “여수 엑스포 해역의 생물·화학적 해양환경 특성”, 한국해양환경공학회지, Vol. 13, No. 1, 1-11.
- [12] 류상옥, 김주용, 유환수, 2000, “반폐쇄된 무안만에서 부유물질의 계절적 변동 및 운반양상”, 한국지구과학회지, Vol. 21, No. 2, 128-136.
- [13] 류상옥, 김주용, 장진호, 2001, “서해남부 무안만의 표층퇴적물의 분포와 조간대 퇴적물”, 한국지구과학회지, Vol. 22, No. 1, 30-39.
- [14] 류상옥, 유환수, 김민지, 문병찬, 1998, “한국 서해 남부 함평만의 퇴적환경”, 한국지구과학회지, Vol. 19, No. 3, 343-353.
- [15] 류상옥, 유환수, 김주용, 이인곤, 김민지, 1999, “한국 서남부 탄도만의 표층퇴적물 분포와 동계동안 부유퇴적물의 운반양상”, 한국지구과학회지.
- [16] 류상옥, 유환수, 이종덕, 1999, “함평만 조간대의 표층퇴적물과 집적물의 계절변화”, 한국해양학회지 바다, Vol. 4, No. 2, 127-135.
- [17] 류상옥, 장진호, 이희준, 조영조, 최옥인, 2009, “조석환경 변화에 의한 표층퇴적물의 시공간적 분포변화: 한국 서해안의 무안만”, 한국해양학회지 바다 Vol. 14, No. 1, 10-21.
- [18] 류상옥, 유환수, 전승수, 1997, “한국 서해 남부 함평만 표층퇴적물의 분포 및 특성”, 한국지구과학회지, Vol. 18, No. 5, 367-378.
- [19] 박병노, 이제현, 오종민, 이승희, 한지희, 김유미, 서현희, 노열, 2007, “전남 무안 갯벌 퇴적물에 관한 광물학적 및 생지화학적 연구”, 한국광물학회지, Vol. 20, No. 1, 47-60.
- [20] 박용우, 조양기, 1999, “서해안 함평만의 조석에 관한 수치 실험”, 한국지구과학회지, Vol. 20, No. 4, 380-387.
- [21] 윤석태, 고영구, 류상옥, 1999, “함평만 표층퇴적물과 금속원소들의 분포 특성”, 한국환경과학회지, Vol. 8, No. 6, 677-684.
- [22] 임동일, 정희수, 추용식, 박광순, 강시환, S-Y YANG, 2002, “한국 서해 남부 함평만의 해안선 변화 연구 I. 해안절벽의 침식과 후퇴”, 한국해양학회지 바다, Vol. 7, No. 3, 148-156.
- [23] 임주환, 문형태, 박래환, 최휴창, 전인성, 2005, “영광원자력 발전소 주변의 조간대 및 조하대 대형저서동물의 분포특성”, 한국수산학회 춘계학술대회, 87-88.
- [24] 임현식, 최진우, 2001, “한국 서남해역 함평만 조하대의 가을 철 저서동물 군집구조”, 한국수산학회지, Vol. 34, No. 4, 327-339.
- [25] 은고이나, 2000, “영광 원자력 발전소 주변해역 표층퇴적물의 입도와 원소분포 특성”, 자원환경지질, Vol. 33, No. 3, 195-204.
- [26] 이경식, 전수경, 2009, “서해 함평만의 해수 물성구조 및 조류 특성”, 한국지구과학회지, Vol. 30, No. 2, 247-256.
- [27] 이대선, 조현서, 이규형, 이문옥, 2003, “무안반도 연안수질의 시공간적 변동과 소규모 방조제의 영향”, 한국해양환경공학회지, Vol. 6, No. 2, 24-36.
- [28] 이학영, 2003, “가마미 해수욕장(전남 영광) 갯벌의 미세조류의 분포에 관한 연구”, 한국환경과학회지, Vol. 12, No. 7, 715-724.
- [29] 이희준, 박은순, 이연규, 정갑식, 추용식, 2000, “만 입구에서 부유퇴적물 거동과 플럭스: 한반도 서해 남부 함평만의 여름철 특성”, 한국해양학회지 바다, Vol. 5, No. 2, 105-118.
- [30] 장진호, 김여상, 조영길, 1999, “해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용 : 한국 서해안의 함평만”, 한국해양학회지 바다, Vol. 4, No. 2, 117-126.
- [31] 전라남도, 2009, “해양수산통계수첩”, pp.43.
- [32] 정용훈, 김영태, 채운주, 이충원, 고경란, 김소영, 정주영, 양재삼, 2005, “금강하구의 장기관측 자료 분석”, 한국해양학회지, Vol. 10, No. 3, 139-144.
- [33] 조은섭, 최용규, 2005, “남서해역의 유해성 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* Margalef 모니터링을 위한 환경특성과 식물플랑크톤 군집 동태”, 한국환경과학회지, Vol. 14, No. 2, 177-184.
- [34] 조주환, 김백운, 임동일, 2001, “항공사진을 이용한 서남해 함평만의 해안선 변화 관측”, 한국지구과학회지, Vol. 22, No. 4, 317-326.
- [35] 조현서, 조천래, 박정채, 강원영, 2006, “영광주변해역 해양환경특성에 관한연구”, 해양환경안전학회 추계학술발표회, 113-117.
- [36] 진재율, 염기대, 오재경, 김종학, 1996, “영광원자력발전소 주변의 해저퇴적상 변화에 관한 고찰”, 한국해양환경공학회 정기학술강연회 발표논문 초록집, 95-101.
- [37] 해양수산부, 2002, “해양환경공정시험법”.
- [38] 황선도, 임양재, 김용철, 차형기, 최승호, 1998, “서해 영광연안 수산자원 I. 주목망 어획자원의 종조성”, 한국수산학회지, Vol. 31, No. 5, 727-738.

2010년 3월 29일 원고접수

2010년 5월 7일(1차), 12월 15일(2차), 심사수정일자

2011년 1월 25일 게재확정일자