

한국 남해 동부 연안 해역에서 홍수기와 갈수기 동안 수질환경 특성과 변동

정도현 · 신현호 · 정승원 · 임동일*

한국해양과학기술원 남해연구소 해양시료도서관

Variations and Characters of Water Quality during Flood and Dry Seasons in the Eastern Coast of South Sea, Korea

Do Hyeon Jeong, Hyeon Ho Shin, Seung Won Jung and Dhong Il Lim*

Library for Marine Samples, South Sea Branch, KIOST, Geoje 656-830, Korea

Abstract - Physiochemical characters of sea waters during summer flood- and winter dry-seasons and their spatial variations were investigated along the coastal area off the eastern South Sea, Korea. Using the hierarchical clustering method, in this study, we present comprehensive analyses of coastal waters masses and their seasonal variations. The results revealed that the coastal water of the study area was classified into six water masses (A to F). During summer season, the surface water was mainly occupied by the coastal pseudo-estuarine water (water mass B) with low salinity and high nutrients and the river-dominated coastal water (water mass C) with low nutrients, respectively. The bottom water was dominated by cold water (water mass D) with very low temperature, high salinity and high nutrients, compared to masses of surface water. Notably, the water mass B, with high concentrations of nutrients (silicate and nitrogen) and low salinity, which is strongly controlled by the water quality of river freshwater, seems to play an important role in controlling the water quality and further regulating physical processes on ecosystem in the eastern coastal area of South Sea. The water mass D (bottom cold water) coupled with a strong thermocline, which exists in near-bottom layer along the western margin of Korea Strait, has a low temperature, pH and DO, but abundant nutrients. This water mass disappears in winter owing to strong vertical mixing, and subsequently may act as a pool for nutrients during winter dry-season. On the other hand, vertically well-mixed water column during the winter season was typically occupied by the Tsushima (water mass E) and the coastal water (water mass F) with a development of coastal front formed in a transition zone between them. These winter water masses were characterized by low nutrient concentration and balance in N/P ratio, compared with summer season with high nutrient concentrations and strong N-limitation. Accordingly, the analysis of water masses will help one to better chemical and biological processes in coastal area. In most of the study area, characteristically, the growth of phytoplankton community is limited by nitrogen, which is clearly different with coastal environment of West Sea of Korea, with a relative lack of phosphorus. It

* Corresponding author: Dhongil Lim, Tel. 055-639-8580,
Fax. 055-639-8429, E-mail. oceanlim@kiost.ac

showed the western and the southern coasts in Korea are substantially different from each other in environmental and ecological characteristics.

Key words : physiochemical properties, seasonal variations, water masses, limiting nutrients, Korean coasts

서 론

연구해역은 광양만에서 울산에 이르는 남해 동부 연안역으로 대마난류수(Tsushima Current), 동해 냉수 그리고 강 의 담수 등 서로 다른 특성의 수괴들이 접하고 있다. 해안선으로는 반폐쇄성 지형의 광양만, 진해-마산만 등 크고 작은 여러 만(bay)과 광활한 갯벌이 발달하고 있으며, 섬진강과 낙동강을 통하여 많은 양의 담수와 육상 물질들이 연안 해역으로 유입되고 있다. 섬진강과 낙동강으로부터의 연간 담수 유입량은 각각 $5.8 \sim 8.7 \times 10^8$ 톤과 63×10^9 톤 그리고 부유물질 유입량은 각각 0.8×10^6 톤과 1×10^8 톤에 달한다(Kim and Park 1980; Park *et al.* 1996). 일반적으로 큰 강과 연계된 연안역 생태계의 기초 생산력은 육상으로부터 공급되는 가용 영양염의 시·공간적 농도 변화와 소비율에 직접 영향을 받는 것으로 알려져 있다(e.g. Humborg *et al.* 1997; 이 1999). 특히 몬순 기후의 영향을 받는 우리나라 연안역에서는 여름철 홍수기에 많은 양의 담수 유입으로 인하여 염하구 환경과 유사한 물리-화학적 특성의 연안수가 일시적으로 광범위하게 발달하는 것으로 보고되고 있다(임 등 2003; 최 등 2007). 이러한 연안 염하구성 환경에서는 담수와 해수의 혼합이 빠르게 일어나고, 물리-화학적 반응 현상이 크게 약화되어 많은 양의 육상기원 물질들이 여과 없이 외해역까지 운반되어, 연안역의 수질환경과 기초 생태계는 크게 변화한다(Humborg *et al.* 1997; 양 등 2000; 정 등 2000). 따라서 큰 강과 연계된 연구해역에서 갈수기와 비교하여 홍수기 동안의 수질과 생태계는 담수의 유입 정도와 확산에 따른 연안성 염하구의 발달 정도에 따라 크게 달라질 것으로 예상된다.

한편, 연구해역의 외해역에서는 열(heat)과 염분을 공급하는 남해의 대표적 외양수인 고온-고염의 대마난류수가 유입되며, 그 결과 해안선과 평행하게 강한 열(수온)과 염분 전선(thermal front)이 계절적으로 형성된다(양 1994; 강과 전 1999). 이러한 연안 전선역에는 영양염류가 풍부하여 기초 생산력이 높아 어장으로써 그 가치가 매우 중요하며, 종 조성 또한 풍부한 것으로 알려져 있다(Floodgate *et al.* 1981; Kiorboe *et al.* 1988; Nakata *et al.* 1995; 강과 전 1999). 이와 같이 섬진강과 낙동강으

로부터 영양염이 풍부한 담수와 고온-고염의 대마난류수의 빈영양수괴 확장 후퇴 그리고 연안 전선대의 형성과 발달은 연구해역의 환경-생태계를 조절하는 주요 환경요소일 뿐만 아니라 이들 수괴의 시·공간적 변동은 남해 연안의 기초 생산력을 비롯한 어류의 산란과 성장 그리고 어장 형성 등에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다(김 2000).

남해 연안역은 서해 연안역과 달리 인위적 오염에 의한 영향이 상대적으로 적어 오래전부터 해양수산자원의 산란 및 보육장으로서 널리 이용되는 청정해역으로 평가되어 왔으나, 최근에는 지속적인 오염물질의 축적과 적조 발생 그리고 수온 상승 등으로 인하여 환경-생태계가 변화하고 있다(e.g. Yang and Kim 1990; 양 등 2000; 정 등 2000; 최 등 2001; 조와 최 2005). 특히 지난 10년 동안 남해 연안의 연평균 수온은 약 $1 \sim 1.9^\circ\text{C}$ 증가한 것으로 보고되고 있으며, 부산 해역은 약 1.5°C , 여수 해역은 약 1.7°C 로 남해의 서쪽 해역에서 더 큰 증가를 보인다(김과 이 2010). 이러한 수온 증가는 수온전선을 약화시킬 뿐만 아니라 전선대를 해안선 방향으로 후퇴하는 결과를 초래할 것으로 예측하고 있다(김과 이 2010). 또한 남해 연안과 연결된 제주 연안역에서는 겨울철(2월)의 수온상승이 여름철(8월) 수온상승보다 3배 이상 빠르게 진행되고 있어, 연교차가 감소하고 겨울철 온난화 현상이 두드러진 것으로 나타났다(장 등 2006). 이러한 연구결과에 근거할 때, 남해 연안역은 향후 아열대화로의 급격한 환경과 생태계 변화가 예상된다. 이와 같이 연구해역은 급격한 수온상승과 함께 계절적으로 다양한 특성의 수괴 발달, 반폐쇄성 지형의 여러 만(bay)과 갯벌의 발달 등 물리-지형학적으로 복잡한 해양 환경을 이루고 있어 해수환경 특성이 시(계절)·공간적으로 매우 역동적일 뿐만 아니라 생물자원 측면에서도 중요한 보전 해역임을 고려할 때, 수질환경 특성 및 기초해양생물 생산에 대한 전반적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 남해 동부 해역(광양 섬진강-울산 해역)에서 홍수기인 여름철과 갈수기인 겨울철에 해수의 물리적(수온, 염분), 화학적(pH, 용존산소량, 화학적산소요구량, 총부유물질 및 입자성유기탄소 농도, 영양염 농도) 그리고 생물학적(chlorophyll-*a*) 특성과 조절요인을

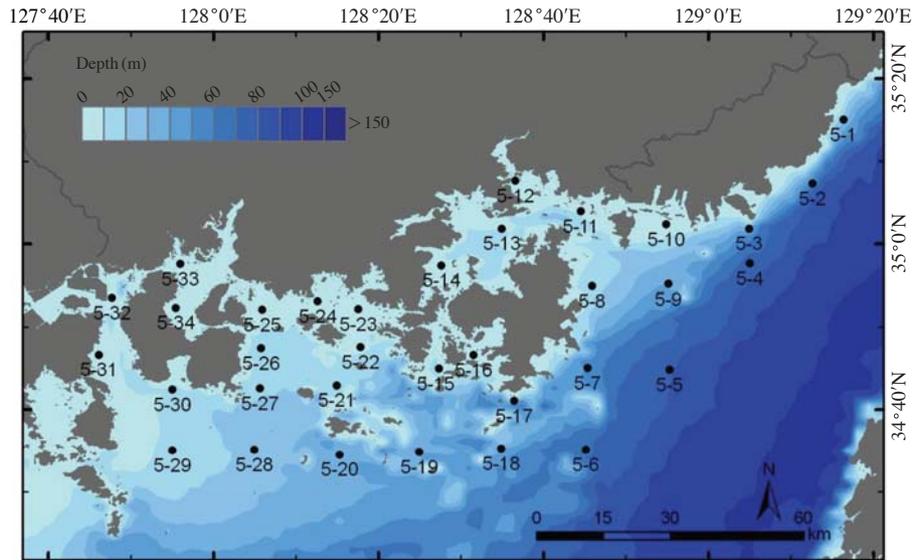


Fig. 1. Map showing the bathymetry of the study area with sampling stations.

파악하고, 통계적 분석을 통한 이들의 공간적 변동 특성을 분석하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구를 위해 남해 동부 연안역 총 34개 정점에서 2010년 8월과 2011년 2월에 수온과 염분 등 해수의 물리적 인자들의 현장 관측과 용존산소와 영양염류 등의 지화학적 성분 분석을 위한 해수(표층수와 저층수)시료가 채취되었다(Fig. 1). 연구해역으로 유입되는 담수 양을 추정할 수 있는 섬진강(순천)과 낙동강(부산) 유역에서의 여름철(2010년 7월과 8월) 총강수량은 각각 850 mm와 450 mm 그리고 겨울철(2011년 1월과 2월) 총강수량은 두 지역 모두 약 60 mm 미만으로 낮다(기상청 2010).

각 수층에서의 수온, 염분, pH는 CTD (Idronaut Ocean Seven 304)와 다항목수질측정기(YSI6600E)를 이용하여 측정하였으며, 용존산소량(포화도), 총부유물질 농도, 부유입자성유기탄소/질소 농도, 영양염(규산염 규소, 용존 무기인, 질산염 질소, 아질산염 질소, 암모니아 질소) 농도, 그리고 엽록소(chlorophyll-*a*) 농도는 해양생태계조사 지침서(국토해양부 2009)에 제시된 방법에 준하여 분석하였다. 용존산소량은 윙클러-아지드화나트륨 적정법, 그리고 엽록소(Chlorophyll-*a*) 농도는 아세톤 추출법에 준하여 형광측정기로 2~3회 반복 분석하였다. 부유물질의

입자성유기탄소 및 질소 함량은 GF/F 여과지에 여과된 시료를 10% 염산 증기로 처리한 후, 원소 분석기(Flash EA 1112, Thermo)를 이용하여 분석하였다. 규산염 농도는 시료에 산성인 몰리브덴산암모늄(ammonium molybdate)을 가한 후 염화물(stannous chloride)과 옥살산(oxalic acid)의 환원 시약을 가해 황색의 몰리브덴산착염체를 형성시켜 발색강도를 측정하였다. 인산염 농도는 시료에 몰리브덴산암모늄(ammonium molybdate), 타르타르산안티모닐 칼륨(antimony potassium tartrate), 황산의 혼합 시약을 가하고 아스코르빈산(ascorbic acid)으로 환원시켜 발색강도를 측정하였다. 아질산염 농도는 시료에 설퍼닐아미드(sulfanilamide) 용액과 나프틸에틸렌디아민염산(naphthylene diamine dihydrochloride) 용액을 가하여 아조색소를 생성시켜 발색강도를 측정하였으며, 질산염 농도는 시료를 Cd-Cu 환원 칼럼을 통하여 아질산염으로 환원시킨 후, 아질산염 분석 방법과 동일하게 분석하였다. 이들 영양염의 발색강도는 FIA (Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, LACHAT)를 이용하여 측정하였다. 암모니아 농도는 시료를 치아염소산 나트륨(sodium hypochloride) 용액과 반응시킨 후, 페놀(phenol)과 촉매인 니트로프로시드 나트륨(sodium nitroprusside)을 가해 청색의 인도페놀을 형성시켜 발색강도를 자외선분광분석기(UV-Spectrophotometer, Hewlett Packard 8453)로 측정하였다. 모든 시료에 대하여 2~3회 중복분석을 실시하였으며, 표준해수시료(Wako CSK standard) 분석을 통한 분석 자료의 회수율은 92~105% 범위이다.

Table 1. Statistic summary of physical-chemical properties in surface and bottom water during summer and winter

		Summer				Winter			
		Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD
Surface water	Temperature (°C)	15.8	29.0	25.0	2.8	4.1	13.8	9.3	3.0
	Salinity (psu)	16.1	33.6	28.3	5.0	33.4	35.0	34.4	0.5
	pH	7.88	8.57	8.27	0.16	8.18	8.37	8.24	0.04
	DO (mg L ⁻¹)	5.8	14.2	9.8	2.2	9.1	12.6	10.2	1.0
	DO (%)	78	209	141	34	105	120	111	4
	SPM (mg L ⁻¹)	0.5	43.1	6.5	9.1	1.0	13.9	4.4	3.2
	POC (μM)	11.3	460.0	79.0	91.9	12.7	97.3	34.8	19.4
	PN (μM)	1.2	29.1	8.5	8.2	2.0	9.4	4.3	1.6
	DSi (μM)	1.9	71.5	18.0	21.3	0.4	13.2	5.9	3.0
	DIP (μM)	0.06	1.01	0.34	0.27	0.05	0.42	0.23	0.09
	DIN (μM)	0.5	43.3	8.7	12.3	0.4	15.8	3.7	2.7
Chl- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	0.0	27.4	5.0	6.4	0.1	13.5	1.8	2.5	
Bottom water	Temperature (°C)	10.6	25.5	16.5	3.0	4.0	12.2	8.8	2.7
	Salinity (psu)	27.1	34.7	33.5	1.4	33.4	34.9	34.4	0.5
	pH	7.62	8.03	7.96	0.07	8.18	8.39	8.23	0.05
	DO (mg L ⁻¹)	2.0	7.9	5.3	1.1	9.0	12.4	10.2	1.0
	DO (%)	25	113	67	13	104	119	109	4
	SPM (mg L ⁻¹)	1.6	18.5	6.6	4.6	1.7	19.5	7.5	4.4
	POC (μM)	12.4	167.7	55.9	38.2	15.7	106.4	47.2	20.6
	PN (μM)	1.2	13.5	5.9	3.5	1.6	8.6	5.3	1.7
	DSi (μM)	17.6	76.3	26.0	10.2	1.1	11.4	6.1	3.2
	DIP (μM)	0.31	3.04	0.94	0.42	0.05	0.41	0.25	0.10
	DIN (μM)	8.5	27.0	13.8	3.4	0.6	8.6	3.8	2.4
Chl- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	0.0	6.7	1.1	1.5	0.1	16.1	2.6	3.2	

Min.: minimum value, Max.: maximum value, SD: standard deviation

결과 및 고찰

1. 해수의 물리·화학적 인자들의 시(계절)·공간 변동 특성과 요인

연구해역에서 여름과 겨울철에 관측·분석된 수질 인자들의 평균값과 범위 등의 간단한 통계량을 Table 1에 제시하였다.

1) 수온

여름철(8월) 표층과 저층수의 수온은 각각 16~29°C (평균 25°C)와 11~26°C (평균 17°C) 범위로 표·저층수 간 성층현상이 뚜렷한 반면, 겨울철(2월) 수온은 강한 수직적 혼합작용에 의해 표·저층수 모두 4~14°C (평균 9°C) 범위로 유사하다. 여름철 표층 수온은 전반적으로 연안역에서 외해역으로 갈수록 높아지며, 특징적으로 20°C 미만의 저온수가 부산-울산 해안선(정점 1과 2)을 따라 나타난다(Fig. 2). 이러한 공간변화는 바람의 영향이 적은 저층수에서 더욱 뚜렷하며, 15°C 미만의 저온수는 부산 앞 외해역까지 크게 확장하여 발달한다. 겨울철 수온은 연안역에서 10°C 미만으로 낮고 외해역으로 갈수록 높아 약 14°C에 달하여, 여름철 분포와는 대조적

공간변화를 보인다(Fig. 3). 이러한 공간변화의 계절적 차이는 계절에 따른 육상과 해양의 비열 차 때문으로, 여름철에는 육상으로부터 높은 수온, 겨울철에는 낮은 수온의 담수 유입에 의한 것으로 해석된다(임 2007, 2008). 이와 함께 여름철 갯벌의 가열(또는 겨울철 갯벌의 냉각) 등 또한 이러한 공간변화 현상을 초래하는 이차적 요인으로 제시된다.

2) 염분

여름철 염분은 표·저층수에서 각각 16.1~33.6 psu (평균 28.3 psu)와 27.1~34.7 psu (평균 33.5 psu) 범위이며, 홍수기 많은 양의 담수 유입으로 인하여 표층수에서 크게 낮아 강한 성층을 형성한다. 표층수의 염분은 전반적으로 약 31 psu 이하로 뚜렷한 공간변화가 없는 반면, 저층수에서는 연안(32 psu 이하)에서 외해역(34 psu 이상)으로 갈수록 점진적으로 증가하는 뚜렷한 공간변화를 보인다(Fig. 2). 겨울철 염분은 표·저층수에서 비슷한 33.4~35.0 psu (평균 34.4 psu) 범위이며, 연안역에서 33.6 psu 이하로 낮고, 외해역으로 갈수록 35.0 psu까지 점진적으로 증가하는 공간변화가 뚜렷하다(Fig. 3). 여름철 표층수를 제외하면, 연구해역의 염분은 전반적으로 육상의 담수와 외해수의 점진적 혼합으로 인하여 외

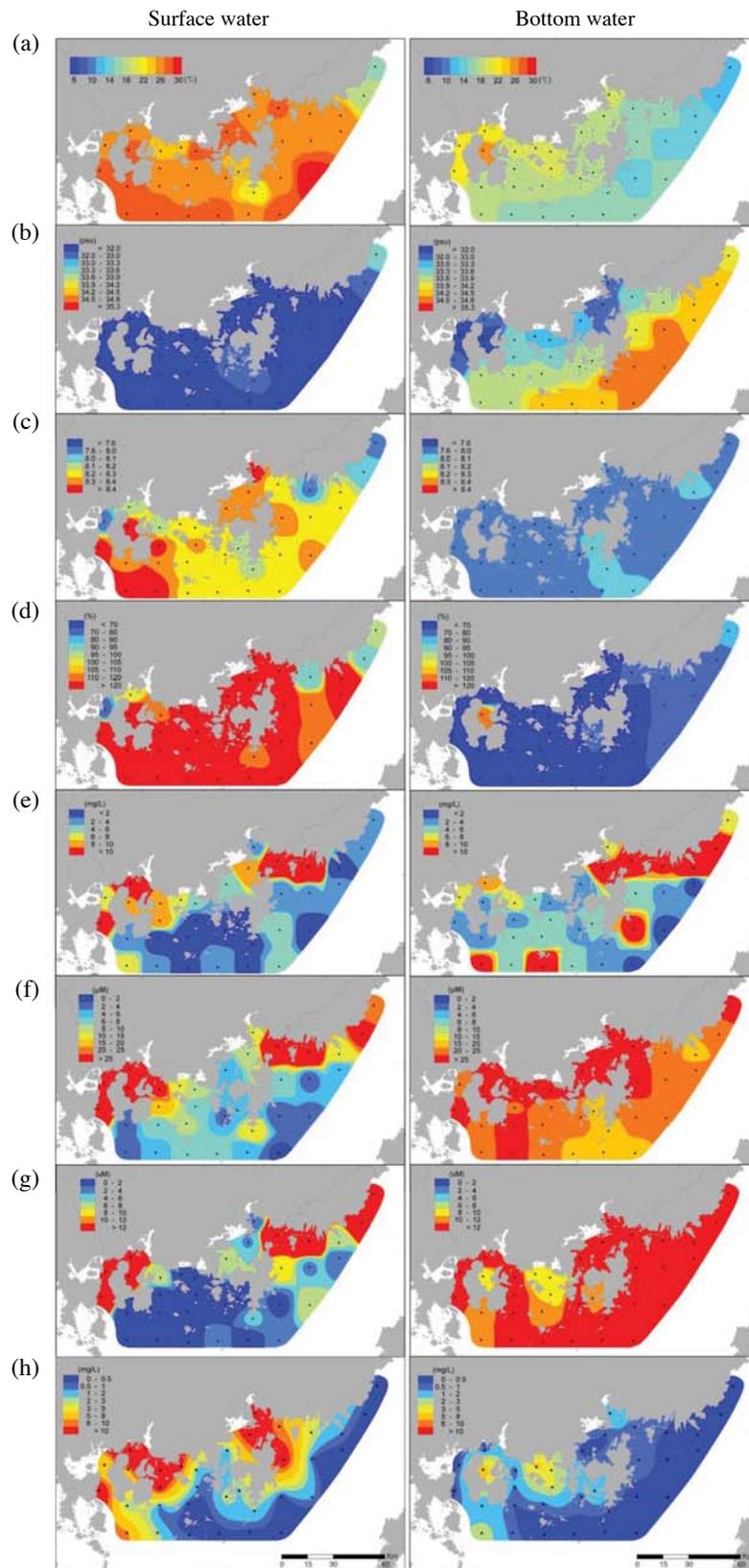


Fig. 2. Spatial variations of physiochemical parameters in surface and bottom waters during summer-flood season. (a) temperature, (b) salinity, (c) pH, (d) DO saturation, (e) SPM, (f) silicate (DSi), (g) dissolved inorganic nitrogen (DIN) and (h) chlorophyll-*a*.

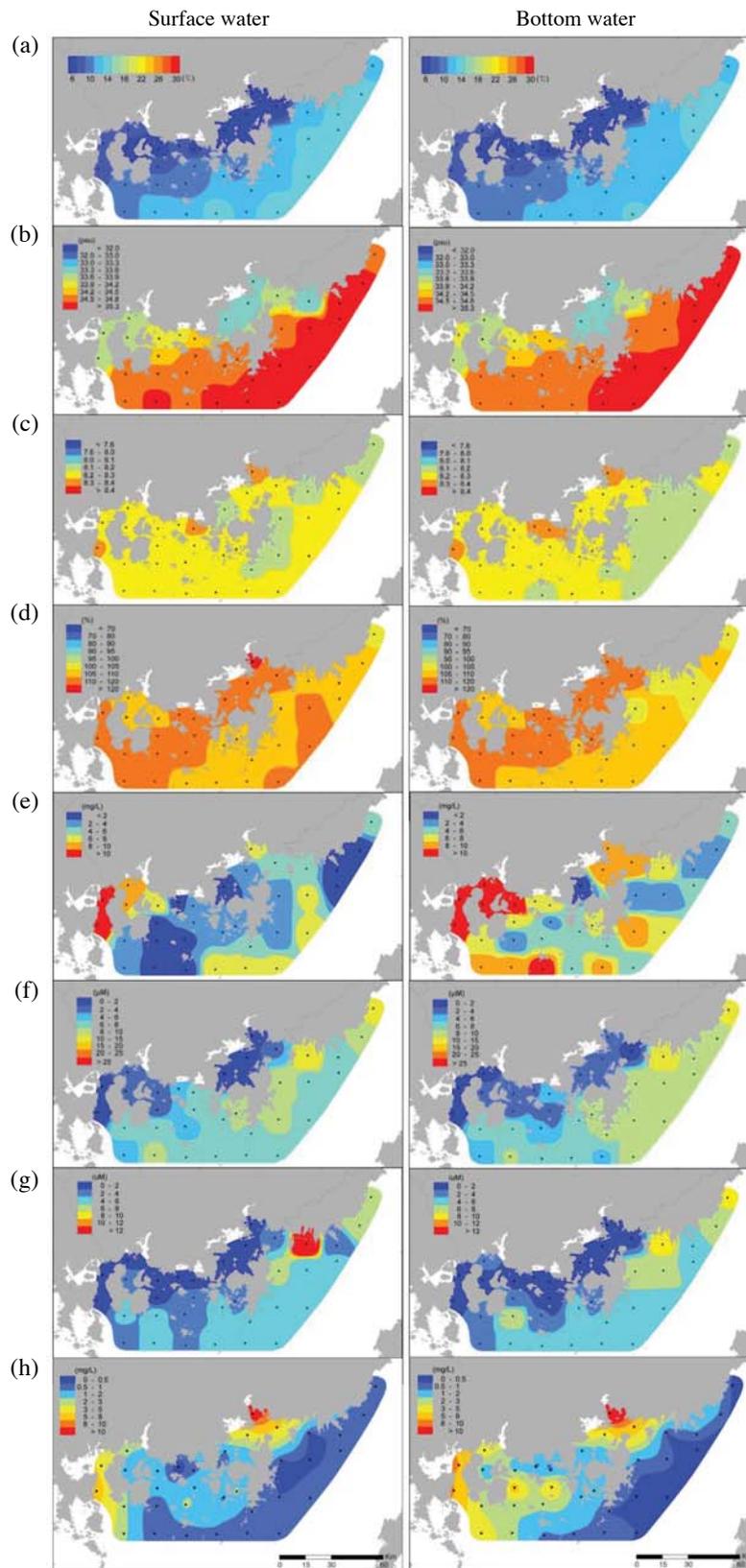


Fig. 3. Spatial variations of physiochemical parameters in surface and bottom waters during winter-dry season. (a) temperature, (b) salinity, (c) pH, (d) DO saturation, (e) SPM, (f) silicate (DSi), (g) dissolved inorganic nitrogen (DIN) and (h) chlorophyll-*a*.

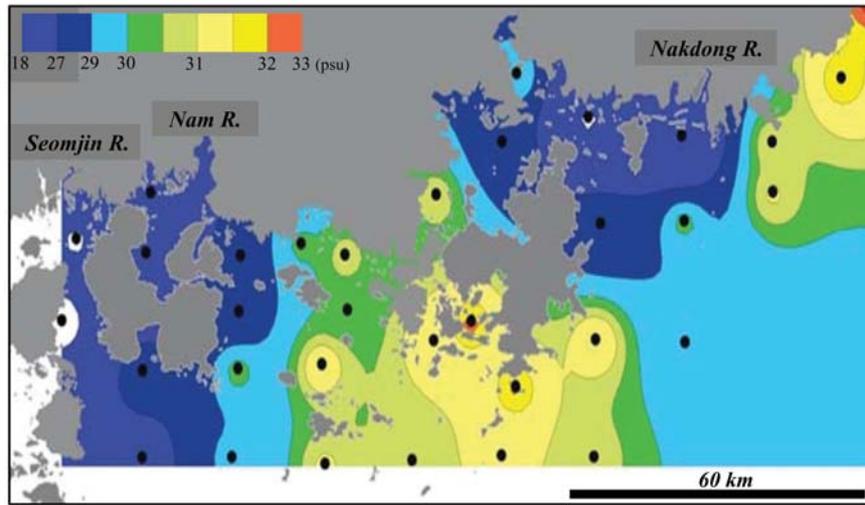


Fig. 4. A detailed salinity distribution of surface water during summer-flood season. Note that nutrient-enriched Nakdong and Seomjin River water mass with low salinity (<29 psu) extends up to 50~60 km away from the river mouth, respectively.

해역으로 갈수록 해안선과 평행하게 증가하는 공간변화를 보인다. 여름철 외해역에서 발달하는 수온과 염분의 강한 성층은 가을과 겨울철로 가면서 표층 수온의 하강과 혼합작용에 의해 소멸한다. 한편 여름철 염분의 공간 분포에 근거할 때, 표층수의 경우 섬진강-낙강의 담수 플룸(염분 29 psu 미만)은 광양만으로부터 여수해협을 따라 외해역으로 약 60 km 이상, 낙동강 담수 플룸은 외해역으로 약 50 km 이상 확장되는 것으로 나타났다(Fig. 4).

3) pH와 용존산소량

여름철 pH는 표·저층수에서 각각 7.88~8.57(평균 8.27)과 7.62~8.03(평균 7.96) 범위로 표층수에서 높다. 표층수의 경우 대한해협 주변을 포함한 몇몇 정점을 제외하면 대부분 약 8.1~8.6 범위인 반면, 저층수는 전반적으로 7.6~8.0 범위로 수온 및 염분과 유사하게 표·저층수간 차가 크다(Fig. 2). 겨울철 pH는 표·저층수에서 유사한 8.18~8.39(평균 8.24) 범위이며, 뚜렷한 공간 변화는 관찰되지 않는다. 여름철 용존산소량(DO)은 표층수에서 5.8~14.2 mg L⁻¹(평균 9.8 mg L⁻¹), 저층수에서 2.0~7.9 mg L⁻¹(평균 5.3 mg L⁻¹) 범위로, 수온이 낮은 저층수에서 오히려 낮다. 용존산소 포화도 또한 표층수에서 120% 이상(평균 141%)으로 과포화상태인 반면, 저층수는 대부분 70% 미만(평균 67%)으로 불포화상태에 있다(Fig. 2). 겨울철 용존산소량은 표·저층수에서 9.0~12.6 mg L⁻¹ 범위로 유사하며, 포화도 또한 서로 비슷한 104~120% 범위로 포화 또는 과포화상태이다. 겨울철에는 표·저층수 모두 연안역에서 11 mg L⁻¹(포화도 약

100% 이상) 이상으로 높은 반면, 외해역으로 갈수록 9 mg L⁻¹(포화도 약 100% 미만) 미만으로 감소하는 뚜렷한 공간변화를 보인다(Fig. 3).

연안역에서 용존산소량(포화도)과 pH의 시·공간적 변화는 일차적으로 수온 또는 담수와 해수의 혼합 그리고 이차적으로 식물플랑크톤 번식에 따른 화학적 현상과 밀접한 관련을 갖는다. 특히 연안역에서 식물플랑크톤의 번식은 용존산소량과 pH 값을 동시에 증가시키는 주요 요인이다(임 등 2007a). Fig. 5에 제시된 것처럼 여름철 표층수의 경우 수온이 증가함에 따라 용존산소량은 증가하는 비이상적(abnormal) 관계를 보인다. 또한 여름철의 경우 pH 값은 용존산소량과 뚜렷한 상관성을 보여 용존산소와 함께 pH가 동시에 증가하는 현상을 보인다(Fig. 5). 따라서 여름철(특히 표층수)에는 식물플랑크톤 번식에 의한 생물학적 요인은 용존산소량과 pH를 조절하는 주요 요인으로 제시된다. 한편, 여름철 저층수의 경우에는 전반적으로 용존산소량이 매우 낮으며(Fig. 5), 특히 반폐쇄적 지형의 마산만과 광양만에서는 4~5 mg L⁻¹ 범위로 저서생물 서식 한계 농도(<4~4.5 mg L⁻¹, Diaz and Rosenberg 1995; U.S. EPA 2006)에 가까운 저산소층을 형성하고 있다. 이러한 계절적 저산소층의 형성은 강한 수온-염분 성층에 의한 수직 혼합작용의 제한, 낮은 수온에 의한 식물플랑크톤 번식 약화 그리고 해저 퇴적물의 유기물 분해에 따른 소비 등에 의한 것으로 저서 생태계에 영향을 미칠 수 있는 “hypoxia(<2~3 mg L⁻¹)” 현상이 발생하는 것으로 추정된다(이 등 2000). 더욱이 저산소층 형성과 함께 낮은 pH는 산성화 진행을

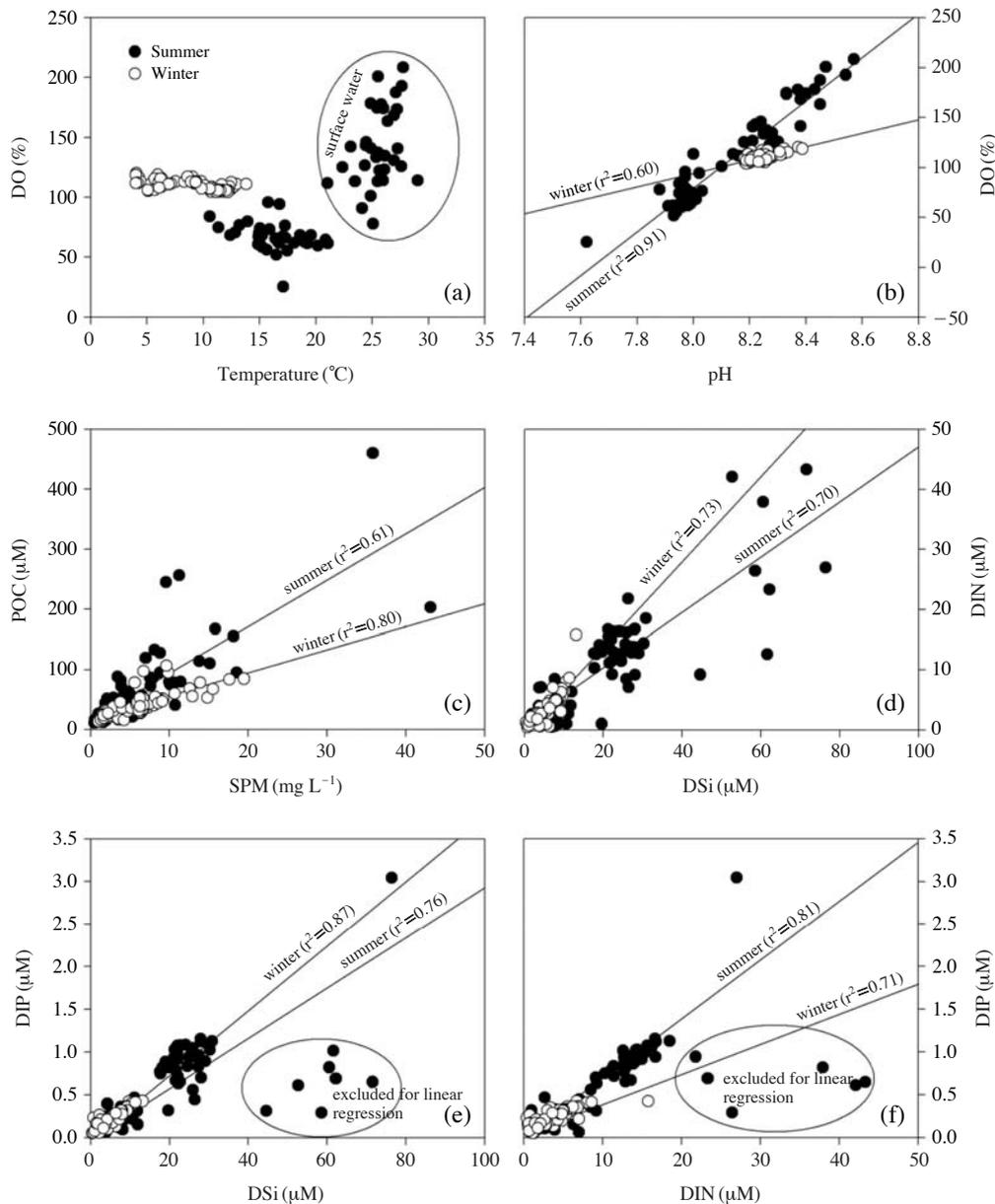


Fig. 5. Relationships between (a) temperature and DO saturation, (b) pH and DO saturation, (c) SPM and POC concentrations, and (d), (e) and (f) between concentrations of nutrients in surface and bottom waters of summer and winter. P values in all regression lines are less than 0.05.

축진시켜 동물플랑크톤(익족류), 유공충, 산호 등의 탄산염 골격이 용해(dissolution)되는 결과를 초래하고 있는 것으로 나타났다(한국해양연구원 2012).

4) 부유물질 및 입자성유기탄소 농도

여름철 총부유물질(SPM) 농도는 표층수 $0.5\sim 43.1\text{ mg L}^{-1}$ (평균 6.5 mg L^{-1}), 저층수 $1.6\sim 18.5\text{ mg L}^{-1}$ (평균 6.6 mg L^{-1}) 범위로, 표·저층수 모두에서 섬진강과 낙동강

입구 주변 해역에서 10 mg L^{-1} 이상의 높은 정점을 제외하면 전반적으로 5 mg L^{-1} 이하로 낮다(Fig. 2). 겨울철 표층수의 농도는 $1.0\sim 13.9\text{ mg L}^{-1}$ (평균 4.4 mg L^{-1}), 저층수는 $1.7\sim 19.5\text{ mg L}^{-1}$ (평균 7.5 mg L^{-1}) 범위로 여름철 표층의 몇몇 정점을 제외하면 여름철과 유사하다(Fig. 3). 부유물질의 입자성유기탄소(POC) 농도는 총부유물질 농도의 분포와 유사하며, 여름철 표·저층수에서 $11\sim 460\text{ }\mu\text{M}$, 겨울철 $13\sim 106\text{ }\mu\text{M}$ 범위로 여름철(특히 연안역) 표

층수에서 가장 높다. 여름철에는 표·저층수 모두 섬진강과 낙동강 주변 연안역에서 70 μM 이상으로 높은 반면 외해역에서는 30 μM 미만으로 낮은 뚜렷한 공간변화를 보인다. 겨울철의 경우에도 비록 제한적이나 섬진강과 낙동강 입구 주변 정점들에서 높은 특징을 보인다. 연구해역에서 입자성유기탄소 농도는 일차적으로 총부유물질 농도와 좋은 상관관계를 보이며, 특징적으로 이들 사이의 비가 저층수(평균 7 ± 3.7)와 비교하여 표층수(평균 13 ± 5.7)에서 약 2배 정도 크다(Fig. 5). 즉, 같은 부유물질 농도에서는 표층수에 함유된 부유물질 내의 유기탄소 농도가 더 높은 것을 의미하며, 이는 유기탄소의 기원이 표·저층수 사이에서 차이가 있음을 지시한다.

5) 영양염(규산염, 용존무기질소, 용존무기인) 농도

여름철 규산염(DSi) 농도는 표·저층수에서 각각 1.9~71.5 μM (평균 18.0 μM)과 17.6~76.3 μM (평균 26.0 μM) 범위이며, 전반적으로 저층수에서 높다. 특히 표·저층수 모두 섬진강과 낙동강 주변 연안 해역과 부산-울산 연안 냉수에서 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 2). 겨울철 규산염 농도는 표·저층수 모두 0.4~13.2 μM (평균 6.0 μM) 범위이며, 여름철과 비교하여 전반적으로 낮고, 연안역에서 큰 감소를 보인다. 공간분포 또한 표·저층수 모두 연안역에서 낮고, 외해역에서 높아, 여름철 공간분포와 대조적이며, 특징적으로 부산 앞 외해역의 저층 냉수에서 뚜렷이 높은 농도 분포를 보인다(Fig. 3). 홍수기인 여름철 규산염 농도는 담수 유입에 의한 공급이 많은 강 주변 연안역에서의 높은 분포를 제외하면, 해양에서의 소비에 의해 전반적으로 낮은 반면, 저층수에서는 강한 성층에 의해 표층으로 공급-소비되지 못해 전 해역에서 높은 농도를 보인다. 한편 갈수기인 겨울철에는 여름철과 대조적으로 연안역에서 매우 낮고, 외해역으로 갈수록 증가하며, 더욱이 저층수의 경우 여름철과 비교하여 크게 감소하였다. 이러한 원인은 여름철 강한성층을 이루던 수주(water column)가 겨울철 수직 혼합작용이 활발해 지면서 저층수의 영양염이 표층으로 이동 소비된 결과로 해석된다. 사실상 규산염 농도의 이러한 겨울철 소비는 겨울철 저온수계에서 규조류의 대량 증식에 의

한 것으로 해석된다(국토해양부 2011).

연구해역 용존무기질소(DIN=질산염+아질산염+암모늄)의 농도는 여름철 표층과 저층수에서 각각 0.5~43.3 μM (평균 8.7 μM)과 8.5~27.0 μM (평균 13.8 μM) 범위이며, 강 입구 주변 연안역을 제외하면 성층현상에 의해 저층수에서 더 높다(Fig. 2). 겨울철 농도는 표·저층수 모두에서 0.43~15.80 μM (평균 3.8 μM) 범위로 농도는 여름철보다 낮으나, 수심이 깊은 대한해협 부근의 몇몇 정점을 제외하면 표층수의 공간분포와 유사하다. 연구해역의 용존무기인(DIP) 농도는 여름철에는 표·저층수에서 각각 0.06~1.01 μM (평균 0.34 μM)과 0.31~3.04 μM (평균 0.94 μM) 범위로 저층수에서 높은 농도를 보인다. 겨울철에는 표·저층수에서 모두 0.05~0.42 μM (평균 0.24 μM) 범위로 서로 유사하나, 여름철보다 낮다. 이러한 영양염류의 공간적 농도 변화는 여름과 겨울 모두에서 전반적으로 서로 유사하게 나타는 바(Figs. 3 and 5), 용존무기질소와 인 농도의 공간적 변화의 원인 또한 전체적으로 규산염과 유사한 것으로 해석된다.

6) 엽록소 농도

여름철 엽록소(chlorophyll-*a*) 농도는 표층수에서 0.1~27.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균 5.0 $\mu\text{g L}^{-1}$), 저층수에서 0.1~6.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균 1.1 $\mu\text{g L}^{-1}$)로 표층수에서 크게 높다(Table 1). 겨울철에는 표·저층수에서 0.1~16.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균 2.2 $\mu\text{g L}^{-1}$) 범위이며, 몇몇 정점을 제외하면 표·저층수에서 5 $\mu\text{g L}^{-1}$ 미만으로 유사하다. 겨울철 농도는 여름철 표층수보다 낮고, 저층수 보다 다소 높은 농도를 보인다. 공간적 변화 또한 수심이 낮고 영양염 공급이 원활한 섬진강과 낙동강 주변 연안해역을 비롯한 마산-진해만에서 항상 높게 분포한다(Figs. 2 and 3). 본 연구에서 엽록소 농도에 영향을 미치는 환경요인을 분석하기 위해 상관성 분석을 실시하였다(Table 2). 분석 결과, 여름철 표층수에서는 엽분과 음의 상관성, 부유물질, 입자성유기탄소 및 규산염 농도와는 양의 상관성을 보이며, 저층수에서는 엽분, 용존무기인 및 용존무기질소 농도와는 음의 상관성, 수온과는 양의 상관성을 보인다. 겨울철에는 표·저층수 모두 수온, 엽분, 규산염, 용존무기인, 용존무기질소 농도

Table 2. Result of Pearson correlation analysis between chlorophyll-*a* concentrations and environmental factors ($p < 0.05$)

		Temperature	Salinity	pH	DO	SPM	POC	PN	DSi	DIP	DIN
Summer	Surface	ns	-0.472	ns	ns	0.526	0.757	0.639	0.475	ns	ns
	Bottom	0.617	-0.623	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.393	-0.557
Winter	Surface	-0.543	-0.510	0.726	0.640	0.445	0.891	0.720	-0.587	-0.557	-0.344
	Bottom	-0.577	-0.597	0.761	0.669	0.468	0.822	0.462	-0.637	-0.704	-0.519

ns: no significance

와 전반적으로 양호한 음의 상관성을 보이는 반면, 총부유물질, 입자성유기탄소 농도와는 양의 상관성을 갖는다.

결과적으로 엽록소 농도는 모든 계절의 표·저층수에서 엽분과 음의 관계를 보이는 반면, 총부유물질 및 입자성유기탄소 농도와는 양의 상관관계를 보인다. 이러한 결과는 엽록소 농도의 분포가 전반적으로 연안역에서 높고 외해역으로 갈수록 낮은 공간변화를 반영하며, 더 나아가 식물플랑크톤 등의 생물 잔류물이 총부유물질(또는 입자성유기탄소) 농도를 증가시키는 주요인으로 작용하고 있음을 지시한다. 영양염의 경우, 여름철 표층수에서는 규소와 양의 상관관계를 보이는 반면, 겨울철에는 표·저층수 모두 음의 상관관계를 보인다. 즉, 여름철 표층수에서 규소와의 양의 상관관계는 집중강우에 따른 용존 규소 유입 증가에 따른 식물플랑크톤 중 규조류(diatoms)의 밀도 증가에 따른 결과로 추정된다. 한편 엽록소 농도와 용존무기질소 사이에는 여름철 표층수를 제외하면 모두 음의 상관성을 보인다. 여름철 저층수에서의 용존무기질소와 음의 상관성은 성층화에 따른 표층으로부터 공급 제한 그리고 여름철 연안의 저층의 유기물 분해에 의한 암모늄 농도 증가에 의한 것으로 해석된다. 사실상 연구해역에서 여름철 암모니아 농도는 표층(평균 $1.82 \mu\text{M}$, 범위 $0.1 \sim 6.2 \mu\text{M}$)과 비교하여 저층(평균 $2.9 \mu\text{M}$, 범위 $0.6 \sim 26.4 \mu\text{M}$)에서 더 높다.

겨울철에 나타나는 음의 상관관계는 연안역에서 활발한 식물플랑크톤의 번식에 따른 빠른 소비와 함께 육상으로부터의 공급 감소에 의한 결과로 판단된다. 이러한 현상은 특히 광양만, 마산만 등의 반폐쇄성 지형의 여러 만(bay)들에 위치하는 연안역에서 더 크게 나타나며, 이는 갈수기인 겨울철에도 낮은 수심과 느린 유속 등에 의해 기초생산력이 높으며, 이로 인한 겨울철 영양염 고갈(depletion) 현상이 나타나는 것으로 해석된다.

2. 영양염 공급원과 잠재적 제한영양염

연구해역의 영양염류 농도는 몇몇 정점을 제외하면 전반적으로 서로 좋은 상관성을 보이는 바(Fig. 5), 표층수의 경우 담수의 영향을 직접 받는 섬진강과 낙동강 입구 주변 해역을 제외하면 두 계절 모두 유사한 농도 범위인 반면, 저층수의 경우에는 여름철에 더 높다(Figs. 2 and 3, Table 1). 이러한 계절 및 공간변동은 크게 여름철 담수에 의한 공급과 겨울철 혼합작용에 의한 저층수로부터의 영양염 공급에 의한 것으로 해석된다. 이는 엽분과 영양염 농도사이의 관계에서 뚜렷하게 설명된다(Fig. 6). 홍수기인 여름철의 경우 표층수에서의 영양염 농도

는 엽분과 반비례 관계를 보여 전반적으로 담수와 해수의 혼합에 의한 보존적 특성을 보이는 반면, 갈수기인 겨울철에는 엽분과 매우 양호한 양의 상관성을 보여 내만역보다 오히려 외해역에서 더 높은 농도를 보인다. 이러한 결과는 여름철에는 담수가 영양염의 주요 공급원임을 지시하는 한편, 갈수기인 겨울철에는 담수 유입 감소로 인하여 육상보다는 외해역에 발달하는 저층 냉수로부터의 공급이 더 중요한 기원으로 작용하고 있음을 보여준다. 이외에도 강 입구와 만(bay)내에 분포하는 조건대 퇴적물의 계절별 영양염 공급과 소비 변화 또한 이차적 요인으로 제시될 수 있다. 강 등(2009)에 따르면 반폐쇄된 함평만에서 조위에 따른 영양염 변동 분석을 통해 여름철에 갯벌 퇴적물은 영양염의 공급원으로 겨울철에는 영양염의 제거원으로 작용하고 있음을 보고한 바 있다. 따라서 연구해역에 크고 작은 여러 만과 갯벌 퇴적체가 발달하고 있음을 고려할 때, 여름철에는 담수의 유입과 함께 갯벌 퇴적체로부터의 공급이 강과 주변 연안역에서의 높은 영양염 농도의 원인으로 제시되며, 반면 갈수기인 겨울철에는 육상으로부터의 공급 감소와 갯벌 퇴적체에서의 제거 기작이 연안역에서의 낮은 분포의 원인으로 제시된다.

한편, 여름철 저층수의 경우 영양염 농도는 겨울철과 비교하여 2배 이상 높은 특성을 보이며, 표층과 다르게 엽분과 오히려 비례하는 상관성을 보인다(Fig. 6). 이는 여름철 담수에 의한 영양염 공급이 주로 표층수에 제한적으로 이루어지며, 저층수에서는 주로 외해역에 강하게 발달하는 성층현상에 의해 영양염이 소비되지 못하고 계속적으로 축적(또는 보존)된 결과로 해석된다. 이와 같이 표·저층수에서의 영양염 농도의 계절적 변동과 공간변동 차이는 연구해역에서의 영양염 공급과 소비 순환을 잘 반영한다. 결론적으로 여름철 홍수기에 섬진강과 낙동강 등으로부터 공급된 많은 양의 영양염이 활발한 생물활동에 의해 소비되어 고갈되는 표층수와는 대조적으로, 저층수에서는 낮은 수온과 강한 성층 형성으로 인하여 계속 축적-보존된 후, 가을-겨울철 활발한 수층간 혼합작용으로 인하여 표층으로 재공급되는 소비되는 것으로 해석된다. 따라서 여름철 강한 성층으로 인하여 형성되는 약 16°C 이하의 저층수(저층 냉수피)는 담수 공급량이 감소하는 갈수기 동안 연구해역에 영양염을 공급하는 또 다른 주요 공급원으로서 생태계를 유지-조절하는 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 더욱이 겨울철 강한 수직적 혼합작용은 저층수로의 산소공급(영양염 공급)과 함께 낮은 pH를 중화시켜 건강한 생태계를 유지시키는 중요한 물리적 기작으로 제시된다. 따라서 여

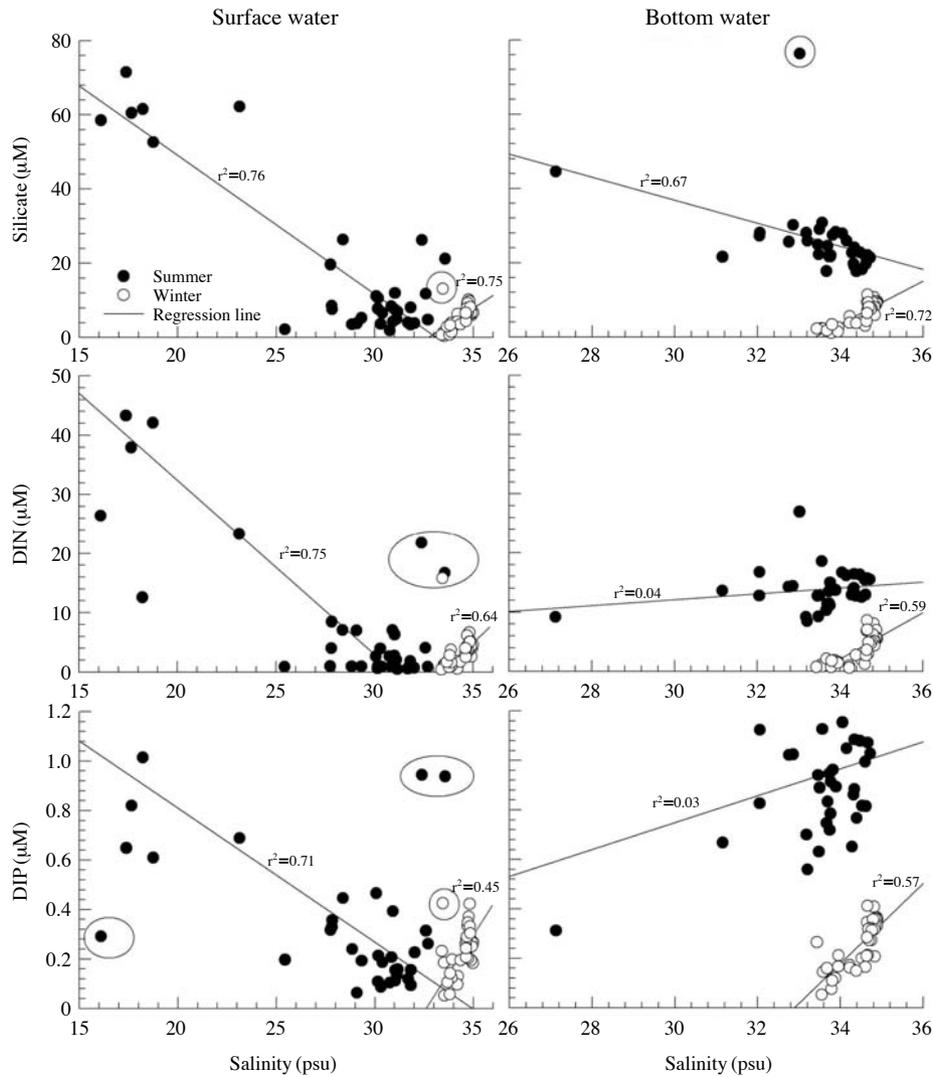


Fig. 6. Correlations between salinity and concentrations of nutrients (DSi, DIN, DIP) in surface waters of summer and winter seasons. Data within circles are excluded in calculation of linear regression and P values in all regression lines are less than 0.05.

름철 저층수의 낮은 pH와 용존산소량으로 인하여 저서 생태계에 큰 영향을 미칠 수 있는 반면, 겨울철 강한 혼합작용에 의해 영양염의 주요 공급원으로 작용하고 있어 중요한 생태계 조절자로서 제시된다.

해수중 N/P, Si/N, (Ca+MG)/(Na+K) 등의 화학적인 비가 생태계에서 다른 식물플랑크톤의 군집 구조를 촉진시킬 수 있다는 연구결과에 따라 (Pearsall 1930), 최근까지 영양염 비에 따른 식물플랑크톤의 종조성 및 현존량 변화에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다 (Tilman *et al.* 1982; Howarth 1988; Hecky and Kilham 1998). 영양염 비를 제한영양염의 개념에서 최근에는 식물플랑크톤 종조성에 영향을 미치는 인자로도 연구가 진행되고 있어 연안역에서 영양염 비의 분포 파악은 생태환경을 이해하

는 또 다른 중요 요소로서 제시되고 있다 (Twomey and Thompson 2001; Yin *et al.* 2001; Hashimoto and Nakano 2003). 연구해역의 DSi/DIN 비는 여름철 1~20 (평균 4.4), 겨울철 1~11 (평균 1.9) 범위로 두 계절 모두 “Redfield-Brzezinski Ratio” (Si/N=1, Brzezinski, 1985)보다 높다 (Fig. 7a). 전반적으로 겨울철과 비교하여 홍수기인 여름철에 높고, 지역적으로도 겨울철에는 일정한 반면 여름철에는 강과 연계된 연안역에서 상대적으로 낮고 외해역에서 높다. 즉, 여름철의 경우 담수의 영향을 직접 받는 강과 인접한 해역에서는 상대적으로 높은 질산염 공급으로 인하여 DSi/DIN 비가 낮은 반면, 외해역에서는 3~20 범위로 매우 높아 질산염이 식물플랑크톤의 잠재적 제한영양염 (potential limiting nutrient)으로 작용하고 있는 것으

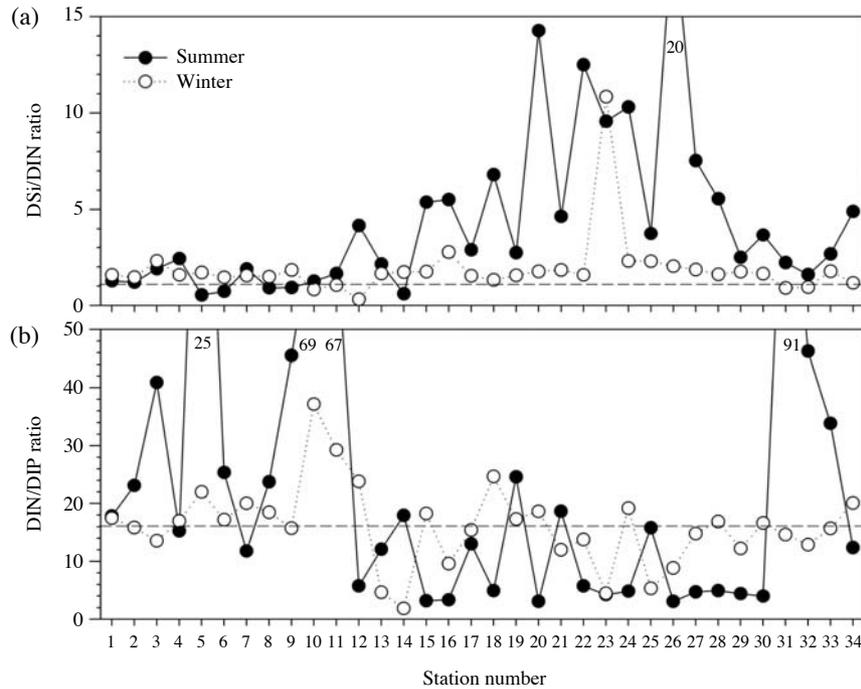


Fig. 7. (a) DSi/DIN and (b) DIN/DIP ratios in surface water of each station during summer and winter seasons.

로 판단된다. 그러나 겨울철의 경우에는 몇몇 정점을 제외하면 모든 해역에서 1~2 범위로 규산염과 질산염 농도가 서로 균형을 유지하고 있는 것으로 해석된다.

연구해역의 DIN/DIP 비는 여름철 3~91 (평균 23), 겨울철 2~37 (평균 16) 범위로 겨울철에 낮다. 여름철의 경우 낙동강과 섬진강 입구 주변의 높은(20 이상) 정점들을 제외하면, 대부분 12~16 범위 이하로 낮다(Fig. 7b). 따라서 “Redfield Ratio (16)”를 고려할 때 질산염의 상대적 과잉 공급이 이루어지는 강 입구 주변 정점들을 제외하면, 여름철 연구해역은 전반적으로 질산염이 부족한 환경으로, 식물플랑크톤의 잠재적인 제한인자로 작용한다. 겨울철 또한 마산만의 내만과 낙동강 입구 등의 3정점(정점 10~12)에서 20 이상인 것을 제외하면, 대부분 12~20 범위로 질산염과 인산염 농도비가 균형을 유지하거나, 질산염 농도가 상대적으로 약간 부족한 상태에 있는 것으로 판단된다. 따라서 연구해역은(특히 여름철) 담수 영향이 강한 강의 입구와 주변 해역을 제외하면 전반적으로 질산염이 상대적으로 고갈된(depletion) 환경으로 평가된다. 이러한 결과는 임 등(2003)의 기존 남해 연안역 DIN/DIP 비 결과와도 잘 일치한다. 그러나 남해 연안의 이러한 용존무기질소의 부족(질소가 잠재적 제한 영양염) 현상은 용존무기인이 잠재적 제한영양염으로 작용하는 서해 연안역(질산염 부화)과는 대조적인 특징이

다(임 등 2007b, 2011). 서해와 남해 연안에서 이러한 영양염 비의 지역적 차이는 강에 의한 담수 유입량, 갯벌의 발달정도, 투명도 그리고 인위적 오염물질 유입량 등의 여러 환경적 요소들의 차이에 의한 것으로 해석된다(임 2011). 특히 큰 강과 함께 연안역에 대규모 산업단지 와 도시가 발달하는 서해 연안역의 경우 오염 기원의 용존무기질소 공급이 남해 연안보다 많고, 큰 조차로 인하여 이들의 확산범위 또한 매우 넓어, 인이 상대적 부족현상이 광범위하게 나타나는 것으로 해석된다. 이러한 해석은 임 등(2011)에 의해 제시된 자료에 의해서 뚜렷하게 뒷받침되는 바, 서해 연안역에서의 용존무기질소의 농도(평균 25.4 μM)가 남해 연안역(평균 9.7 μM)보다 2 배 이상 높은 반면, 용존무기인의 농도는 서해 연안(평균 0.82 μM)과 남해 연안(평균 0.65 μM)에서 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 서해 연안역의 평균 DIN/DIP 비는 28 로 매우 높은 반면, 남해 연안역의 경우 15로 낮다. 더욱이 연구해역인 남해 동부 연안의 외해역은 DIN/DIP비가 상대적으로 낮은 대마난류(DIN/DIP ratio=14.5, Wong *et al.* 1998)의 영향을 직접 받는 해역으로 남해 연안역의 질소 부족현상의 또 다른 원인으로 제시된다. 결론적으로 서해 연안역은 질소가 상대적으로 부화(excess)된 환경인 반면, 남해 연안역은 부족한 환경으로 정의 될 수 있다. 그러나 홍수기에는 질소가 풍부한 연안 염하구 환

Table 3. Characteristics of water quality in each water mass

	Water Mass	Temp. (°C)	Salinity (psu)	pH	DO (mg L ⁻¹)	DO (%)	SPM (mg L ⁻¹)	POC (μM)	DSi (μM)	DIP (μM)	DIN (μM)	Chl- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	Characteristic of Water Mass
Summer (surface)	Water Mass A (n=2)	16.3 ±0.7	33.0 ±0.8	8.00 ±0.04	7.6 ±0.2	95 ±1	3±1	59 ±33	23.7 ±3.6	0.94 ±0.00	19.3 ±3.6	0.2 ±0.0	East Sea Cold Water
	Water Mass B (n=8)	25.7 ±1.3	18.5 ±2.4	8.19 ±0.26	9.1 ±3.1	125 ±45	20 ±15	232 ±127	61.2 ±6.1	0.68 ±0.24	30.9 ±12.2	10.6 ±9.3	Coastal Pseudo-Estuarine Water
	Water Mass C (n=24)	25.5 ±1.8	30.2 ±1.7	8.31 ±0.10	10.2 ±1.9	148 ±28	4±3	45 ±31	7.6 ±5.4	0.22 ±0.11	2.7 ±2.5	4.0 ±5.1	River-dominated Coastal Water
Summer (bottom)*	Water Mass D1 (n=15)	14.0 ±1.7	34.3 ±0.3	7.98 ±0.02	5.9 ±0.7	71 ±6	8±6	57 ±52	21.3 ±2.3	0.93 ±0.13	14.5 ±1.4	0.3 ±0.2	Bottom Cold Water
	Water Mass D2 (n=17)	17.9 ±1.8	33.2 ±0.8	7.96 ±0.03	4.9 ±0.5	63 ±6	6±3	55 ±27	25.7 ±3.5	0.87 ±0.2	12.8 ±2.7	1.5 ±1.4	Coastal Water
Winter (surface)	Water Mass E (n=20)	11.4 ±1.3	34.8 ±0.1	8.22 ±0.02	9.6 ±0.5	109 ±3	3±2	26 ±8	7.4 ±1.5	0.27 ±0.06	4.5 ±1.2	0.9 ±0.7	Kuroshio Water
	Water Mass F (n=14)	6.3 ±1.9	33.9 ±0.4	8.26 ±0.05	11.1 ±0.7	113 ±4	6±4	47 ±24	3.7 ±3.3	0.17 ±0.1	2.7 ±3.9	3.1 ±3.5	Coastal Water
Winter (bottom)	Water Mass E (n=19)	11.0 ±1.2	34.8 ±0.1	8.20 ±0.02	9.5 ±0.6	107 ±4	6±0.4	38 ±1	8.6 ±1.5	0.32 ±0.03	5.6 ±1.4	1.0 ±1.2	Kuroshio Water
	Water Mass F (n=15)	6.1 ±1.6	34.0 ±0.4	8.27 ±0.0	11.2 ±0.6	112 ±4	10±5	59 ±24	2.9 ±1.2	0.16 ±0.05	1.5 ±0.7	4.6 ±4.0	Coastal Water

*Values of two stations (station no. 14 and 34) identified as outlier are excluded in analysis. Temp.: Temperature

경 (염분 20 psu 미만)이 남해 연안역에 광범위하게 형성되는 것을 고려할 때, 남해 연안역의 물리-화학적 특성이 계절적 또는 시기적으로 크게 차이를 보여준다. 특히 일 시적 염하구 환경을 이루는 홍수기에는 예외적으로 인이 잠재적 제한영양염으로 나타난다. 이와 같은 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).

3. 남해 동부 연안역 수질환경 특성

연구해역 내에서 여름과 겨울철 연안수의 통합적 수질환경 특성과 공간적 분포 변화를 파악하기 위해 수온, 염분, 용존산소포화도, 용존규산염, 용존무기질소, 용존무기인의 성분을 이용한 군집분석을 실시하였으며, 군집분석은 가까운 개체들끼리 묶어감으로써 군집을 만드는 병합적 방법에 의한 계층적군집화 (agglomerative hierachi-

cal cluster analysis) 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 통계적으로 분류된 각 군집들을 편의상 하나의 수괴로 서술하였다.

홍수기인 여름철 표층수는 각각 다른 수질환경 특성을 갖는 3개의 수괴 (수괴-A, -B 그리고 -C)로 구분되는 바 (Table 3), 부산-울산 사이의 연안을 따라 분포하는 저수온의 냉수괴인 수괴-A, 섬진강과 낙동강 연안을 따라 분포하는 염분이 상대적으로 낮은 저염수 (low salinity water)의 수괴-B, 그리고 이를 제외한 연구해역의 대부분에 분포하는 염분의 값이 수괴-A와 B의 중간 특성의 수괴-C로 구분된다 (Fig. 8). 수괴-A는 다른 연안수와 비교하여 수온이 16.3°C로 가장 낮고, 염분은 33.0 psu로 가장 높으며, pH와 용존산소량은 낮은 반면, 영양염은 상대적으로 풍부한 특징을 보인다. 그러나 이들 정점에서 엽록소 농도가 매우 낮은 것을 고려할 때 낮은 수온으로 인하여 식물플랑크톤의 번식이 제한되는 것으로 해석되며, 이는 낮은 pH와 용존산소포화도에서도 잘 나타난다 (Table 3). 이러한 냉수는 여름철에 발생하는 수온 약 11~20°C 범위의 동해 냉수괴 (East Sea Cold Water,

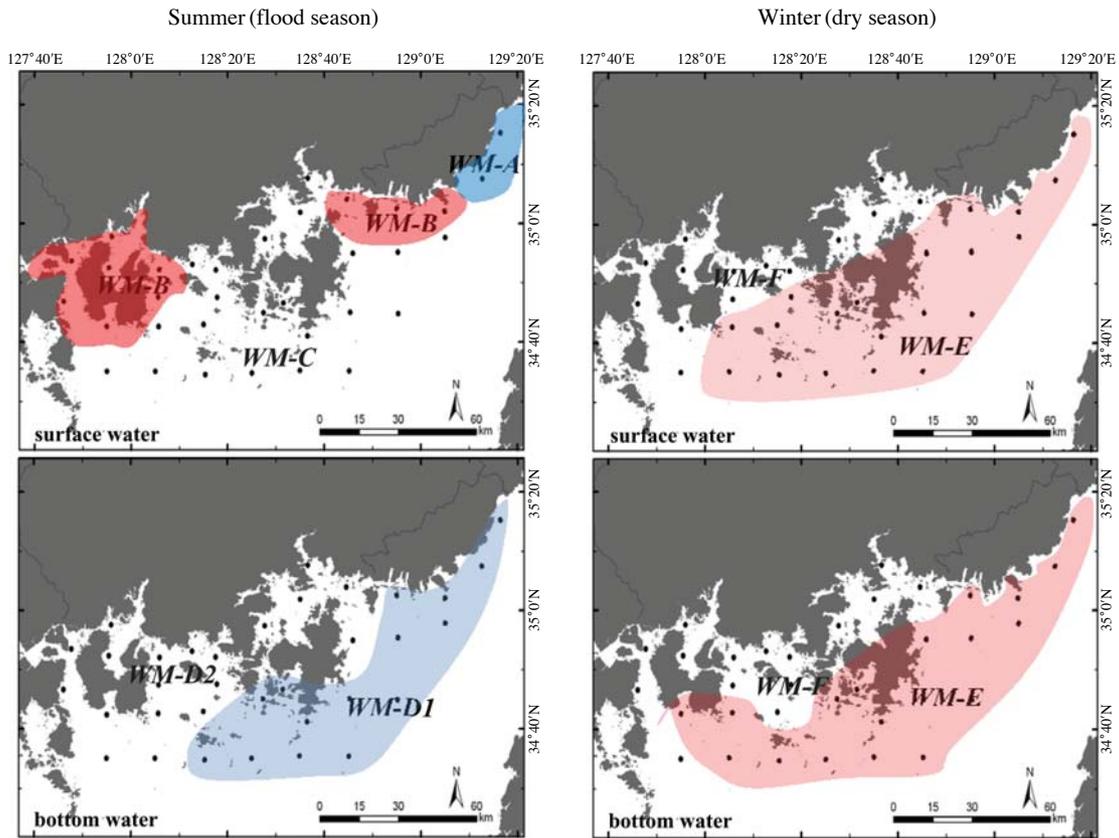


Fig. 8. Seasonal and spatial distributions of water masses in surface and bottom of the study area during summer and winter seasons. This distribution map of water masses will help one to better chemical and biological processes in coastal area. WM-A (water mass A): East Sea Cold Water, WM-B (water mass B): coastal pseudo-estuarine water, WM-C (water mass C): river-dominated coastal water, WM-D (water mass D): bottom cold water, WM-E (water mass E): Tsushima water, WM-F (water mass F): winter coastal water.

ESCW)의 남쪽 끝 부분으로 해석되며 (승 1974; 김과 김 1983; 서 등 2001), 해수중 라돈(Ra) 동위원소 분석에 결과 의하면, 그 기원이 북한한류수인 것으로 보고되고 있다 (양 등 1994). 동해 냉수괴는 때때로 대한해협을 따라 부산 앞 해역까지 확산되어 여름철 낙동강 담수와 함께 남해 동부 연안역 수괴 분포와 일차생태계를 조절하는 또 다른 중요 요소로 제시되고 있다.

섬진강과 낙동강 입구 주변 해역을 따라 넓게 분포하는 저염수의 수괴-B는 평균 염분이 18.5 psu로 매우 낮은 반면, 부유물질 및 입자성유기탄소 그리고 영양염 농도 등은 가장 높으며, 식물플랑크톤의 대 번식에 따른 엽록소 농도가 매우 높은 특성을 갖는다 (Table 3). 특징적으로 이 수괴는 다른 수괴들과 비교하여 상대적으로 질산염 농도가 매우 높을 뿐만 아니라 DIN/DIP 비 (평균 45) 또한 매우 높아, 인산염이 잠재적 제한영양염으로 작용하고 있는 것으로 추정된다. 이러한 특성의 저염수는 광양만 해역에서 보고된 연안 염하구수수괴 (coastal pseudo-

estuarine water)와 대비되는 것으로 해석되며, 홍수기인 여름철에 많은 양의 담수 유입에 의해 연안역에 짧은 기간 형성되는 것으로 알려져 있다 (임 등 2003). 따라서 집중호우 등 몬순(monsoon)기후 특성을 갖는 우리나라 연안역에서는 연안 염하구 (coastal pseudo-estuary) 환경이 광범위하게 발달할 수 있고, 이러한 일시적 염하구 환경의 발달이 육지-해양간 물질 순환에 상당한 역할을 할 것으로 사료된다 (임 등 2003; 최 등 2007). 특히 남해 연안역에서 자주 발생하는 적조 또한 광양만과 섬진강 등 주변 강이나 하천에서 공급되는 육상기원 영양염 물질과 직·간접적으로 밀접한 관계가 있음을 고려할 때 (양 등 2000; 정 등 2000; 권 등 2001; 이 등 2001; 최 2001), 홍수기 동안 연안 염하구의 확장 및 발달은 연구해역의 생태계에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 측면에서 향후 남해 연안 염하구 환경에서 일어나는 해양학적 현상을 더욱 자세히 이해할 필요가 있다.

수괴-C는 평균 염분 30.2 psu 그리고 pH와 용존산소량

이 높고, 영양염은 상대적으로 고갈된 특성을 보이며, 여름철 연구해역 표층수의 대부분을 차지한다. 염분을 고려할 때, 강으로부터 유입된 담수의 영향을 크게 받는 여름철 담수성 연안 수괴 (river-dominated coastal water) 특성으로 해석·정의될 수 있다. 비록 연안 염하구성수괴와 비교하여 엽록소 농도는 낮지만, 매우 낮은 영양염 농도 그리고 매우 높은 수소이온농도와 용존산소포화도를 고려할 때, 활발한 식물플랑크톤 번식이 있었음을 지시한다. 더욱이 이 수괴의 N/P 비가 평균 14로 낮아, 연안성 염하구성수괴와는 대조적으로 질산염이 잠재적 제한 영양염으로 작용한다. 따라서 연구해역의 여름철 표층수는 동해 냉수괴 (수괴-A), 염하구성 수괴 (수괴-B), 담수성 연안 수괴 (수괴-C)로 구분되며, 이러한 수괴의 분포와 특성은 전반적으로 홍수기인 여름철 집중강우에 따른 담수의 유입량에 의한 연안 염하구성수괴 그리고 남하하는 동해 냉수괴의 발달과 확장 정도에 따라 다르게 나타날 것으로 예상된다.

여름철 저층수는 전반적으로 수온이 낮은 낮고, 영양염 농도가 높은 저층 냉수괴 (bottom cold water) 특성의 수괴-D로 구분되며, 수온과 염분 그리고 엽록소 농도의 상대적 차이에 의해 수괴-D1과 D2로 구분된다 (Table 3). 저층 수괴-D1의 평균 수온과 염분은 각각 14.0°C 및 34.3 psu로 표층에서 나타나는 동해 냉수괴 (수괴-A)의 특성과 유사하다. 저층 냉수괴-D1은 울산에서부터 남쪽 방향의 남해도까지 수심이 급격히 깊어지는 대한해협 가장자리를 따라 길게 발달하며 (Fig. 8), 북쪽으로 동해와 연결되는 것으로 추정된다. 표층 수괴들과 비교하여 염분은 높고, pH와 용존산소량 (포화도), 엽록소 농도는 낮고, 영양염류 농도는 표층의 연안 염하구성 수괴 (수괴-B)보다 낮으나, 담수성 연안 수괴 (수괴-C) 보다는 크게 높은 특징을 갖는다 (Table 3). 한편, 저층의 냉수괴-D2는 주로 수심이 낮은 만 (bay) 해역을 중심으로 발달하며 (Fig. 8), 냉수괴-D1과 비교하여 수온과 엽록소 농도는 약간 높고, 염분은 상대적으로 낮으나, 다른 환경요소는 서로 비슷한 특징을 보인다. 위에서 언급한 바와 같이 여름철 저층 냉수괴는 강한 성층과 낮은 수온으로 인하여 식물플랑크톤 번식이 제한되고, 가을과 겨울철로 가면서 강한 혼합작용에 의한 영양염의 주요 공급원으로 작용한다.

겨울철 해수의 물리·화학적 특성은 강한 혼합작용에 의해 대부분의 해역에서 표·저층수간 서로 유사하며, 염분과 수온 등의 상대적 차이에 의해 고염·고온의 수괴-E와 저염·저온의 수괴-F로 구분된다 (Table 3). 이들 겨울철 수괴는 수온과 염분을 제외하면 여름철 표층의 대표적 수괴인 담수성 연안수 (수괴-C)와 유사한 특성을 보인

다 (Table 3). 겨울철 연구해역의 대부분을 지배하는 고염의 수괴-E는 수온과 염분이 평균 각각 11.4°C와 34.8 psu이며, 연안역에 분포하는 수괴-E와 비교하여 영양염 농도는 높고, 엽록소 농도는 낮다. 염분과 분포 범위를 고려할 때, 수괴-E는 전형적인 겨울철 대마난류 수괴의 특성과 유사하다. 한편, 수괴-F는 주로 해안선 부근의 연안역에 좁은 범위로 분포하며, 담수의 영향으로 대마난류수가 변질된 연안성 수괴로 해석되며, 수괴-E와 비교하여 수온과 염분이 낮고, 영양염 농도는 2배 이상 낮은 반면, 엽록소 농도는 높다. 이와 같이 겨울철 수온이 낮은 연안성 수괴에서 높은 엽록소 농도는 식물플랑크톤 현존량 분포에서도 뚜렷하게 나타나는 바, 대마난류 특성의 수괴에서는 100 cells m⁻¹인 반면, 연안 수괴에서는 1000~3000 cells m⁻¹로 매우 높다 (국토해양부 2011). 특히 연안수괴에서는 *Thalassiosira allenii*와 *Eucampia zodiacus*가 우점하여 기초생산력 증가를 주도하였으며, 이는 여름철 수괴에서의 우점종인 *Skeletonema cf. marinoi*와 구분된다 (국토해양부 2011). 결과적으로 광양만, 마산만 등의 반폐쇄성 지형의 여러 만 (bay)들이 위치하는 연안역에서는 갈수기인 겨울철에도 낮은 수심과 느린 유속 등에 의해 기초생산력이 증가하며 (김 등, 2006; 노 등 2006), 이로 인한 겨울철 영양염 고갈 (depletion) 현상이 뚜렷하게 나타난다. 연안성 수괴 (수괴-F)와 대마난류 (수괴-E) 사이에 강한 연안전선이 발달하며 (양 1994), 이러한 전선은 직간접적으로 남해 생태계 구조에 영향을 미쳐, 동물플랑크톤 군집 및 먹이망 구조 그리고 생물생산량이 다른 해역과 크게 다른 것으로 보고되고 있다 (Gong 1971; Kim 1982; Cho *et al.* 1983; 강과 전 1999).

적 요

남해 동부해역에서 해수는 계절에 따라 서로 다른 수질환경 특성의 수괴들에 의해 조절되는 것으로 밝혀졌다. 홍수기인 여름철 표층수는 북한한류 기원의 동해 냉수괴 특성의 수괴-A (East Sea Cold Water), 담수의 영향이 강한 연안성 수괴-B (river-dominated coastal water), 연안 염하구성 수괴-C (coastal pseudo-estuarine water)로 구분된다. 특징적으로 높은 영양염과 엽록소 농도를 갖는 저염의 염하구성 수괴-B는 홍수기인 여름철에 해안선에서 수십 km 떨어진 해역까지 짧은 기간 일시적으로 형성되며, 집중호우 등 몬순 (monsoon)기후 특성을 갖는 우리나라 연안역에서 육지-해양간 물질 순환에 상당한 역할을 할 것으로 사료된다. 여름철 저층수는 저온-고염의

냉수인 저층 냉수괴-D(bottom cold water)가 지배적이며, 표층수의 수괴들과 비교하여 전체적으로 수온, pH, 용존 산소량은 낮은 반면, 높은 영양염 농도 특성을 갖는다. 여름철 저층 냉수괴의 높은 영양염 농도는 강한 성층과 낮은 수온으로 인하여 식물플랑크톤 번식이 제한되어 보존-축적된 결과로, 갈수기인 겨울철 영양염의 주요 공급원으로 작용한다. 갈수기인 겨울철 연구해역의 해수환경은 여름철과 다르게 대마난류수(수괴-E)가 광범위하게 분포하며, 해안선을 따라 연안역의 좁은 범위에 대마난류수가 약간 변질된 연안성 수괴-F가 분포한다. 특히 광양만, 마산만 등의 반폐쇄성 지형의 여러 만(bay)들에 위치하는 연안성 수괴-F에서는 갈수기인 겨울철에도 낮은 수심과 느린 유속 등에 의해 기초생산력이 높으며, 이로 인한 겨울철 영양염 고갈(depletion) 현상이 뚜렷하게 나타난다. 또한 남해 연안성 수괴와 대마난류 수괴 사이에 연안전선이 발달하며, 이러한 전선은 직간접적으로 남해의 기초생산력을 조절하는 중요 환경요소로 작용할 것으로 예상된다. 결론적으로 연구해역은 계절적으로 다른 특성의 수괴의 수괴가 복합적으로 분포하며, 여름철의 수질환경과 일차 생태계는 크게 연안 염하구성 수괴와 저층의 냉수괴 발달 정도에 따라 변화할 것으로 예상되며, 겨울철에는 외양에서 유입되는 대마난류 수괴의 특성에 따라 지배될 것으로 분석된다. 또한 용존무기인이 잠재적 제한영양염으로 작용하는 서해 연안역과 달리 남해 연안역은 대부분 용존무기질소가 잠재적 제한영양염으로 작용하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 제한영양염의 차이는 서해와 남해 연안역이 서로 다른 환경과 다른 생태계 구조를 갖고 있음을 지시한다.

사 사

본 연구는 국토해양부 해양생태계기본조사(PM56430) 및 한국해양과학기술원 무인도서조사사업(PE99152)의 지원에 의해 이루어졌습니다. 현장조사에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 본 논문을 세밀히 검토하고 좋은 의견을 주신 심사위원님께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

강미란, 임동일, 장풍곡, 김기범, 강영실. 2009. 서해 합평만에 서 조위변화에 따른 영양염 변동. 한국해양환경공학회지. 12:202-208.

강영실, 전경암. 1999. 한국 남해 연안전선의 생물-화학적 특성 및 영양학 구조. 한국어류학회지. 32:22-29.

국토해양부. 2009. 해양생태계기본조사-서해 남부 해역. 692 pp.

국토해양부. 2011. 해양생태계기본조사-남해 동부 해역. 842 pp.

권기영, 문창호, 양한섭. 2001. 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 영양염의 거동. 한국수산학회지. 34:199-206.

기상청. 2010. <http://www.kma.go.kr>

김동수. 2000. 한국 남해 중부 연안 어장에서의 수괴의 계절 변화. 한국어업기술학회지. 36:105-116.

김영택, 이호정. 2010. 남해 연안수의 수온상승과 수온전선 후퇴와의 상관성. 한국지구과학회 춘계학술발표대회 요약집. pp.120-122.

김정배, 이상용, 유 준, 최양호, 정창수, 이필용. 2006. 막만 빈 산소 수괴의 특성. 한국해양환경공학회지. 9:216-224.

김철호, 김 구. 1983. 한국 동해안에 출현하는 냉수괴의 특성과 기원. 한국해양학회지. 18:73-83.

노일현, 윤양호, 박종식, 서호영, 김대일. 2006. 남해 중부해역 표층퇴적물 유기물의 시·공간 분포 특성. 한국해양환경 공학회지. 9:203-215.

서영상, 장이현, 황재동. 2001. 하계 동해 연안역에서 발생하는 냉수역의 시공간적 변동 특성. 한국수산학회지. 34:435-444.

승영호. 1974. 8월의 한국 동안에서의 수온분포에 관한 역학적 고찰. 한국해양학회지. 9:52-58.

승영호. 1992. 한반도 주변의 수괴와 해수순환. 한국해양학회지. 27:324-331.

양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구, 물리-화학적 특성. 한국해양학회지[바다]. 5:16-26.

양한섭, 김평중, 이재철, 문창호. 1994. Ra 동위체로 본 하계 동해 남부 연안해역에 출현하는 10°C 이하 냉수괴의 기원. 한국수산학회지. 27:404-412.

이동섭. 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국 해양학회지. 4:371-382.

이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박종수, 고우진, 조영조, 박승윤. 2001. *Cochlodinium polykrioides* 적조 발생기작과 대책 1. *Cochlodinium polykrioides* 적조발생과 소멸의 환경특성. 한국해양학회지[바다]. 6:259-264.

이재성, 김기현, 김성수, 정래홍, 박종수, 최우정, 김귀영, 이필용, 이영식, 박영철, 김평중, 이원찬, 권정노, 엄기혁, 최정일, 전경암, 한정희. 2004. 한국남부 연안의 영양상태 평가와 저층경계면의 중요성. 한국해양학회지. 9:179-195.

이찬환, 정승원, 김종만. 2005. 통영바다목장 해역에서 식물플랑크톤군집에 미치는 환경요인의 영향. Ocean Polar Res. 24:15-24.

이찬원, 권영택, 부민호, 권혁보, 양기섭. 2000. 남해연안 패류 양식장의 부영양화 특성. 한국해양환경공학회. 3:24-33.

- 임동일, 김영옥, 강미란, 장풍국, 신경순, 장 만. 2007a. 한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한인자. *Ocean Polar Res.* 29:349-366.
- 임동일, 노경찬, 장풍국, 강선미, 정희수, 정래홍, 이원찬. 2007b. 한국 서해 경기만 연안역에서 수질환경의 시공간적 변화 특성과 조절 요인. *Ocean and Polar Res.* 29:135-153.
- 임동일, 엄인권, 전수경, 유재명, 정희수. 2003. 한국 남해 연안역에서 여름 홍수기에 형성된 연안 염하구 환경의 물리-화학적 특성. *한국해양학회지[바다]*. 8:151-163.
- 임동일, 최현우, 김영옥, 정희수, 강영실. 2011. 한국 연안 수질성분들(COD, DIN, Chlorophyll-*a*)의 해역별 농도 특성과 등급화: 통계적 접근. *Ocean Polar Res.* 33:13-20.
- 임월에, 이영식, 박종규. 2009. 2008년 남해동부해역의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생 특성. *한국해양학회지*. 14:155-162.
- 장승민, 김성수, 최영찬, 김수강. 2006. 제주도 기온과 주변해역 해수면 온도와의 상관관계에 관한 연구. *한국해양환경공학회지*. 9:55-62.
- 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경재. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생 연구 2: 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. *한국해양학회지[바다]*. 5:27-36.
- 조은섭, 최용규. 2005. 남서해역의 유해성 적조생물 *Cochlodinium polykrikoides* Margalef 모니터링을 위한 환경특성과 식물플랑크톤 군집 동태. *한국환경과학회지*. 14:177-184.
- 최용규, 양준용, 이영식, 유 준, 김대권, 한인성, 고우진. 2007. 한국 남해의 갈수기와 풍수기에 따른 해양 환경 특성. *한국환경과학회지*. 16:459-466.
- 최현용. 2001. 한국 남해 나로도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조 소멸과의 관계. *한국해양학회지[바다]*. 6:49-62.
- 한국해양연구원. 2012. 남해 특별관리해역 생태계 건강지수 개발. *한국해양연구원*. BSPE98582-10041-3, 395 pp.
- Brzezinski M.A. 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J. Phycol.* 21:347-357.
- Cho KD, SY Hong, HJ Kim and YR Yang. 1983. Structure of shelf front and distribution of planktons in the eastern part of the Yellow Sea. *Bull. Korean Fish Soc.* 16:316-329.
- Diaz RJ and R Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and behavioral responses of benthic macrofauna. *Oceanogr Mar. Bio. Ann. Rev.* 33: 245-303.
- Fisher TR, ER Peele, JW Ammerman and L Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 82:51-63.
- Floodgate GD, GE Fogg, DA Jones, K Lochte and CM Turley. 1981. Microbiological and zooplankton activity at a front in Liverpool Bay. *Nature* 290:133-136.
- Gong Y. 1971. A study on the south Korea coastal front. *J. Oceanogr. Soc. Korea.* 6:25-36.
- Harrison PJ, MH Hu, YP Yang and X Lu. 1990. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 140:79-87.
- Hashimoto T and S Nakano. 2003. Effect of nutrient limitation on abundance and growth of phytoplankton in a Japanese Pearl farm. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 258:43-50.
- Hecky RE and P Kilham. 1998. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effect of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* 33:796-822.
- Howarth RW, R Marino and JJ Cole. 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystem. 2. Biogeochemical controls. *Limnol. Oceanogr.* 33:688-701.
- Humborg C, A Ittekkot, A Cociasu and BV Bodungen. 1997. Effect of Danube River dan on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature* 386:385-388.
- Kim BK. 1982. The study of the oceanographic conditions and fishing grounds of purse-seine in the southern sea of Korea. *Bull. Fish Res. Dev. Agency.* 30:7-29.
- Kim WH and YA Park. 1980. Microbiogenic sediments in the Nagdong Estuary, Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea* 15:34-48.
- Kiorboe T, P Munk, K Richardson, V Christense and H Paulsen. 1988. Plankton dynamics and larval herring growth, drift and survival in a frontal area. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 44:205-219.
- Lee YS, T Seiki, T Mukai, K Takimoto and M Okada. 1996. Limiting nutrients of phytoplankton community in Hiroshima Bay Japan. *Wat. Res.* 30:1490-1494.
- Nakata K, H Zenitani and D Inagake. 1995. Differences in food availability for Japanese sardine larvae between the frontal region and waters on the offshore side of Kuroshio. *Fish Oceanogr.* 4/1:68-79.
- Park SC, SK Hong and DC Kim. 1996. Evolution of late Quaternary deposits on the inner shelf of the South Sea of Korea. *Geo-Mar. Lett.* 10:145-149.
- Pearsall WH. 1930. Phytoplankton in English lakes. I. The proportions in the waters of some dissolved substances. *J. Ecol.* 20:241-262.
- Tilman D, SS Kilham and P Kilham. 1982. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 13:349-372.
- Twomey L and P Thompson. 2001. Nutrient limitation of phytoplankton in seasonally open bar-built estuary: Wilson Inlet, Western Australia. *J. Phycol.* 37:16-29.
- U.S. EPA. 2006. National Estuary Program Coastal Condition

- Report, EPA-842/B-06/00, U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water. Washington D.C. p.445.
- Wong GTF, GC Gong, KK Liu and SC Pai. 1998. Excess nitrate in the East China Sea. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 46:411-418.
- Yang HS and SS Kim. 1990. Characteristics of spatio-temporal variation of the water quality in the lower Keum River. *Bull. Korean Fis. Soc.* 23:225-237.
- Yin K, PY Quin, MCS Wu, JC Chen, L Huang, X Song and W Jian. 2001. Shift from P to N limitation of phytoplankton growth across the Pearl River estuarine plume during summer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 221:17-28.

Received: 17 January 2013

Revised: 16 February 2013

Revision accepted: 26 February 2013