

황해 중동부 해역 표층수에서 영양염 원소의 시공간적 분포

차현주 · 김준영 · 고철환 · 이창복
서울대학교 해양학과

Temporal and Spatial Variation of Nutrient Elements in Surface Seawater off the West Coast of Korea

HYUN-JU CHA, JUN-YOUNG KIM, CHUL-HWAN KOH AND CHANG-BOK LEE
Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

황해 중동부 해역에서 영양염 원소들의 시, 공간적 변화를 살펴보기 위해 1995년 5월과 1995년 11월, 1996년 6월의 세차례에 걸쳐 현장조사를 실시하고, 표층수에 대해 염분, 온도, 부유물질 및 입자태 유기탄소와 암모니아, 질산염, 아질산염, 인산염, 규산염 등의 영양염 원소를 분석하였다. 세차례의 현장 조사에서 표층수의 영양염 농도 분포는 암모니아를 제외하면 일반적으로 6월이 가장 낮고 11월이 가장 높은 값을 보이는 한편, 암모니아는 5월에 가장 낮은 농도 분포를 보이고 11월에 가장 높은 값을 보였다. 봄에는 5월에 식물 플랑크톤의 1차 생산 활동으로 영양염이 고갈된 외해역의 표층수는 6월로 되면서 수온약층과 조석전선의 발달로 저층과 강으로부터의 영양염 공급이 더욱 제한되고, 봄철 식물 플랑크톤 대번식기에 증식된 동물 플랑크톤 또는 그 배설물 등이 박테리아에 의해 분해되는 과정에서 암모니아가 수층으로 공급되는 것으로 보인다. 한편, 11월에는 늦가을로 접어들면서 봄-여름철에 형성된 성층이 깨지고 수층의 수직 혼합이 활발해지면서 성층기간 동안 저층수에 축적되었던 영양염 원소들이 표층으로 공급되는 것으로 보인다.

Temporal and spatial variations of nutrient elements (ammonia, nitrate, nitrite, phosphate and silicate) in surface seawater off the west coast of Korea were investigated during three periods of field survey aboard R/V Eardo of KORDI (May 1995 and June 1996) and a patrol vessel of the National Maritime Police (November 1995). In general, the concentrations of nutrient elements were lowest in June and highest in November except for ammonia that showed the lowest concentration in May and the highest in November. The results tell us that the development of thermocline and tidal front restricts riverine and benthic supply of nutrient elements to surface waters in June in the offshore regions of the study area which become nutrient-depleted due to phytoplankton bloom in spring. In late fall (November) the level of nutrient concentrations of the surface waters of the study area become high due to vigorous vertical mixing within the water column, which supplies nutrient-enriched bottom water to the surface waters.

서론

영양염류란 생물활동에 기능적으로 관련된 원소로서 특히 질소(N), 인(P), 규소(Si) 등과 같이 양이 아주 적어 생물의 기초 생산과 성장에 제한을 주는 원소를 말한다(Broecker, 1974; Parsons, 1975). 해양에서의 영양염 특히 질소, 인, 규소는 해양식물의 성장을 조절하는 중요한 요인으로서 작용하며, 이러한 비보존성 성분들은 수괴의 환경을 이해하는데 중요한 요인으로 고려된다(Spencer, 1975). 일반적으로 해양에서 영양염은 육상에서 암석의 풍화에 따른 풍화산물, 유기물의 분해 및 각종 유기성 폐기물의 방류 등에 의해 해양으로 공급되며, 영양염의 공간적 분포를 보면 용승(upwelling) 지역이나 연안역(coastal sea)이

다른 곳에 비해 농도가 더 높고 수직적으로는 저층에서 더 높은데, 이는 표층에서는 생물의 1차 생산활동에 의해 영양염이 고갈되는 반면 저층에서는 침강하던 유기물이 다시 분해되기 때문이다.

황해는 수심이 얇고 주위가 육지로 둘러싸인 반폐쇄성 내만의 특징을 갖고 있고, 주변 육지로부터 많은 양의 육상기원 물질이 강이나 대기를 통해 유입된다. 또한 황해는 지리적으로 중위도 온대역에 위치한 까닭에 해수의 물리적 특성에 있어 계절적 변화가 심하게 나타난다. 즉, 여름철에는 약 400 ly/day 정도에 이르는 태양 복사열에 의해 해수 표층이 가열됨에 따라 표-저층간 수온차가 커져 그 결과로 해수의 수직 혼합이 제한되나 가을로 접어들면서 차가운 대기와 강한 북서계절풍의 영향으로 해수의 수

*본 연구는 1996년도 교육부 기초과학 육성 연구비(BSRI-96-5409)의 지원에 의해 수행되었다.

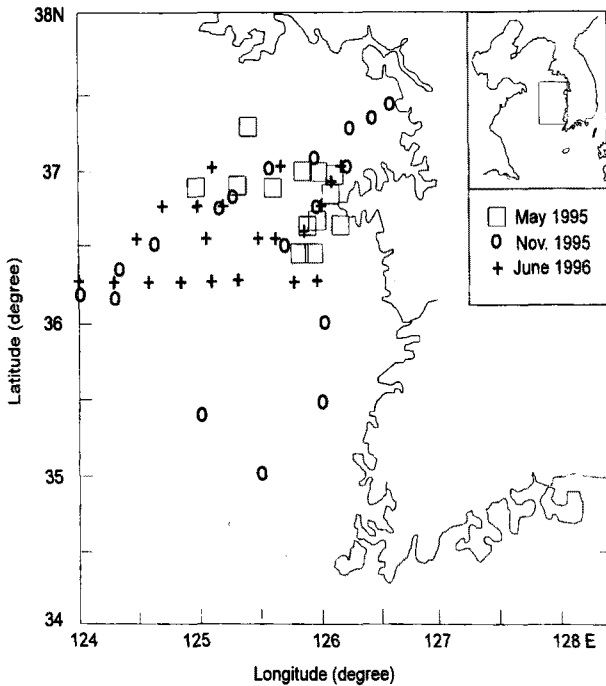


Fig. 1. Map showing the study area.

온이 급격히 냉각되면서 수온약층이 깨어지기 시작하며, 겨울에는 표-저층간의 수직 혼합이 활발하게 이루어진다(이, 1992).

연구지역인 황해 중동부 해역은 한강에서 유출된 담수와 황해상에 발달된 조석의 만나면서 형성되는 조석전선(tidal front)이 발달하는 곳이다(Fig. 1). 조석전선은 대체로 4월 경에 형성되기 시작하여 8월에 가장 뚜렷하게 나타나고 11월 경에는 사라진다(Seung *et al.*, 1990). 조석전선의 형성이나 계절 수온약층의 발달은 생물작용에 큰 영향을 미치며, 강으로부터 공급된 물질의 이동과 분포에도 많은 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Pingree *et al.*, 1975; 1976; Simpson *et al.*, 1982; Choi, 1991).

해양 환경에서의 영양염 공급은 일반적으로 강이나 대기 그리고 저층수로부터의 공급을 통한 외부유입과 표층수 유광대 내에서 유기물 분해를 통한 내부 공급으로 구분될 수 있으며, 전자는 생물의 1차 생산 중 신생산(new production)에 기여하고 후자는 생물의 재생산(regenerated production)에 기여한다. 따라서 수온약층이 발달되면 수층내 물질의 상, 하 이동이 제한되어 저층수로부터의 영양염 공급이 제한되며, 조석전선이 강하게 형성될 경우에는 하천 등으로부터 공급된 영양염이 외해로 확산, 이동되는 것이 차단되어 외해역에서의 영양염 외부 유입량이 제한되며, 이로 인해 생물의 1차 생산을 제한하게 된다(Eppley and Peterson, 1979).

본 연구에서는 봄철에서 여름철에 걸쳐 조석전선의 형성이 보고된 황해 중동부 해역에서 영양염 원소들의 함량 및 시, 공간적 분포 경향을 이해하고, 이들의 조절 요인을 해석하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 1995년 5월과 11월 그리고 1996년 6월의 3차

에 걸쳐 124°00'00"~126°34'30"E, 35°00'00"~37°26'00"N의 해역에 대한 현장조사를 수행하고 해수시료를 채취하였다(Fig. 1). 해수시료는 조사선으로부터의 오염을 막기 위해 산으로 미리 세척한 실리콘 호스를 연동펌프(peristaltic pump)에 연결하여 채수하였다.

암모니아(ammonia)는 시료의 오염을 막기 위해 여과지를 거치지 않고 채수한 물시료에 바로 phenol을 첨가하여 고정시킨 후, citrate 매체 내에서 sodium nitroprusside를 촉매로 하여 phenol과 chlorine 용액을 반응시켜 파란색의 indophenol을 발색시킨 후 635 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다(Ivančić and Degobis, 1984). 기타의 영양염들은 0.45 μ m membrane 여과지를 거쳐 채수한 물시료를 냉동보관하였다가 분석전에 녹여 아질산염(nitrite)은 sulfanilamide 및 N(1-naphthyl)-ethylenediamine dihydrochloride로 발색시켜 543 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였으며, 질산염(nitrate)은 Cd-Cu 환원관을 통과시켜 아질산염으로 환원시킨 후 아질산염 정량방법에 의하여 정량하였다(Strickland and Parsons, 1972). 규산염(silicate)은 시료를 ammonium paramolybdate와 반응시켜 silicomolybdate를 형성시킨 후 metol과 oxalic acid를 함유하는 환원용액으로 환원시켜 파란색으로 발색시킨 다음 725 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다(Fanning and Pilsen, 1971). 한편 인산염(phosphate)은 ammonium molybdate와 ascorbic acid, sulfuric acid 및 potassium antimonytartrate의 혼합용액을 첨가하여 파란색으로 발색시켜 885 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다(Murphy and Riley, 1962).

부유물질(SPM)의 농도는 미리 무게를 잰 0.45 μ m membrane 여과지로 해수시료 1-2 L를 여과한 후 60°C에서 12시간 건조한 후 무게를 측정하여 정량하였다. 입자태 유기탄소(POC)는 450°C에서 2시간 동안 태워 유기물을 미리 제거한 GF/C 여과지에 해수시료 1~2 L를 여과한 후 냉동보관하였다가 실험실로 옮겨 60°C에서 12시간 건조한 후 이 여과지에 과량의 potassium dichromate를 첨가하여 유기물을 산화시킨 후 남은 산화제를 ferrous ammonium sulfate 용액으로 역적정하여 정량하였다(Allison, 1965).

한편, 염분, pH 및 온도는 CTD(model SBE-19) 및 water quality meter(model Horiba U-10)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 1995년 11월의 조사에서 염분은 silver nitrate 용액을 이용한 적정법으로 chlorinity를 구하여 환산하였다.

결과 및 토의

표층수의 수온 및 염분 분포

황해는 수온 및 염분 분포가 계절에 따라 일정한 변화 패턴을 보이고 있다. 조사기간중 관측된 수온은 5월 조사(1995년 5월)에서는 8.5~10.0°C(평균 9.1°C), 11월 조사(1995년 11월)에서는 12.2~14.9°C(평균 13.7°C), 그리고 6월 조사(1996년 6월)에서는 11.2~20.7°C(평균 17.2°C)의 범위를 가져(Table 1, 2 and 3), 6월 조사시기에 가장 높은 평균 수온과 온도변화폭을 보였고 5월 조사시기의 평균 수온이 가장 낮았다. 한편 염분은 5월 조사에서는 31.9~32.4‰(평균 32.1‰), 11월 조사에서는 31.4~33.5‰(평균 32.7‰), 그리고 6월 조사에서는 31.8~32.9‰(평균 32.

Table 1. Physical parameters and nutrient concentrations in surface seawater off the west coast of Korea: 1st Cruise (May 1995)

St.	KP* (km)	Water D. (m)	Salinity (‰)	Temp. (°C)	SPM (mg/l)	POC (%)
2	248	55	32.14	8.81	7.2	1.61
3	224	55	32.17	8.63	3.3	1.93
4	216	63	31.98	8.48	22.4	0.62
6	264	49	32.17	8.86	3.5	0.95
9	328	63	32.15	10.00	1.8	1.57
10	384	58	32.38	9.59	1.0	0.91
13	280	43	32.05	9.90	10.2	0.69
17	176	29	31.94	9.35	10.4	1.40
19	184	63	31.99	8.94	6.7	2.10
18	160	53	31.96	8.67	14.2	1.22

St.	NH ₄ (μM)	NO ₃ (μM)	NO ₂ (μM)	DIN** (μM)	Si(OH) ₄ (μM)	PO ₄ (μM)
2	nd.	8.70	0.76	9.46	3.56	0.44
3	nd.	7.87	0.76	8.63	3.34	0.53
4	nd.	7.30	0.64	7.94	4.45	0.74
6	nd.	3.14	0.36	3.50	2.78	0.62
9	0.96	0.23	nd.	1.19	2.67	0.28
10	nd.	0.81	nd.	0.81	1.32	0.36
13	nd.	1.60	nd.	1.60	0.99	0.25
17	nd.	9.79	0.92	10.71	5.46	0.73
19	10.83	5.85	0.72	17.40	3.22	0.61
18	2.65	8.70	1.01	12.36	5.79	0.73

*KP: Distance (in km) from the coastal station off Incheon (St. 1 in the 2nd cruise)

**DIN=NH₄+NO₃+NO₂

4‰)의 범위로서(Table 3) 11월 조사시기에 염분의 범위가 가장 크게 나타났다.

본 연구해역의 염분과 수온의 공간적 분포를 보면, 연안역과 외해역 사이에 차이가 큰 것이 특징이며(Fig. 2a, b), 염분의 경우 11월 조사에서 연안역과 외해역 간의 차이가 두드러지며, 온도의 경우에는 6월 조사에서 가장 두드러진 차이를 보인다. 특히 6월 조사에서는 염분과 수온 모두 연안역과 외해역 간에 큰 차이를 보이고 있다. 시기별로 보면 염분은 6월 조사시에 가장 낮은 분포를 보이고 있다. 또 수온은 6월 조사시에 가장 높은 분포를 보이고 있다. 수온 분포에서 볼 수 있는 특징은 5월 및 11월 조사시에는 다소 값의 차이는 있으나 비교적 일정한 분포를 보이고 있으나, 6월 조사시에는 연안역과 외해역 간의 차이가 커 강한 조석전선이 형성되고 있음을 알 수 있다.

Nakao(1977)가 제시한 바에 의하면 황해의 수온 및 염분 분포는 봄철과 여름철로 가면서 점차 해수의 표, 저층 간에 밀도 약층이 형성되다가 다시 가을철과 겨울철로 되면서 이와 같은 수직구조가 파괴되는 모습을 보여주고 있다. 특히 표, 저층 간 염분의 차이는 아주 작지만(1‰ 내외) 수온의 표, 저층 간 차이는 약 14°C 이상으로 큰 차이를 보여 계절 수온약층(seasonal thermocline)이 여름철 표층 수온의 급격한 상승에 의해 형성되는 것으로 판단되고 있다(Nakao, 1977).

한편, 황해 중동부 해역에서 나타나는 일반적인 수온, 염분의 연중 변화를 보면, 표층수가 여름에 고온저염, 겨울에 저온고염의 특징을 보이며, 수직적 수층 구조는 겨울에는 표-저층간 해

Table 2. Physical parameters and nutrient concentrations in surface seawater off the west coast of Korea: 2nd Cruise (November 1995)

St.	KP* (km)	Water D. (m)	Salinity (‰)	Temp. (°C)	SPM (mg/l)	POC (%)
1	0	5	31.41	12.2	21.2	1.4
2	84	15	31.93	14.2	5.15	3.0
3	172	18	32.21	14.2	12.31	1.4
4	252	35	32.42	13.2	2.51	4.0
5	336	57	32.85	12.5	1.65	9.2
6	368	60	33.50	12.3	0.76	12.1
7	512	75	33.19	12.6	0.64	15.1
8	584	77	32.54	13.8	0.86	14.1
9	664	78	32.77	12.8	1.02	14.2
10	604	80	33.07	14.8	0.57	23.9
11	600	72	33.51	14.1	0.45	11.2
12	616	59	33.49	14.7	3.14	2.3
13	472	34	33.32	14.9	1.55	3.6
14	352	26	33.43	13.9	1.19	3.6
15	300	38	33.23	14	1.69	1.8
16	216	45	32.60	14.2	6.29	1.5
17	128	30	32.07	14.3	13.62	0.6
18	40	32	31.75	13.9	8.1	0.8

St.	NH ₄ (μM)	NO ₃ (μM)	NO ₂ (μM)	DIN** (μM)	Si(OH) ₄ (μM)	PO ₄ (μM)
1	16.12	20.53	2.03	38.68	11.91	0.93
2	7.4	12.84	0.1	20.34	6.94	0.73
3	6.86	12.83	0.16	19.85	11.11	0.86
4	7.02	10.72	0.06	17.8	9.35	0.79
5	7.63	7.84	0.06	15.53	8.23	0.66
6	4.49	3.56	0.2	8.25	5.98	0.59
7	4.95	2.07	0.1	7.12	3.74	0.38
8	5.95	nd	nd	5.95	0.53	0.11
9	7.02	nd	nd	7.02	1.49	0.25
10	5.95	nd	nd	5.95	2.54	0.11
11	4.34	0.74	0.23	5.31	1.41	0.25
12	4.95	4.88	0.51	10.34	6.7	0.52
13	5.87	3.14	0.92	9.93	13.11	0.38
14	7.4	1.55	0.18	9.13	4.22	0.25
15	6.1	4.96	0.37	11.43	4.7	0.52
16	6.79	7.18	0.12	14.09	12.31	0.59
17	8.93	11.98	0.06	20.97	10.31	0.59
18	5.26	12.64	0.16	18.06	10.63	0.73

*KP: Distance (in km) from the coastal station off Incheon (St. 1 in the 2nd cruise)

**DIN=NH₄+NO₃+NO₂

수의 혼합이 활발한 반면, 봄에 계절 수온약층이 형성되기 시작하여 여름에 강하게 발달하는 특징을 나타낸다(KORDI, 1987; Son *et al.*, 1989). 또한 이 지역은 한강과 황해수가 만나면서 조석 전선(tidal front)이 형성되는 해역으로 조석전선은 일반적으로 4~11월 사이에 발달하고 특히 여름철에 뚜렷하게 나타난다(Seung *et al.*, 1990). 따라서 본 연구지역에서 발견되는 수온과 염분의 시기별 차이는 황해 중동부에서 봄철과 가을철 사이에 발달하는 조석 전선(tidal front)과 계절 수온약층(seasonal thermocline)의 형성에 기인한 현상으로 보인다.

부유물질 및 부유물질 중 유기탄소 함량의 분포

조사기간 중 관측된 부유물질의 함량을 보면 5월 조사의 경

Table 3. Physical parameters and nutrient concentrations in surface seawater off the west coast of Korea: 3rd Cruise (June 1996)

St.	KP* (km)	Water D. (m)	Salinity (‰)	Temp. (°C)	SPM (mg/l)	POC (%)
3	136	47	31.77	12.06	14	1.5
4	168	55	31.77	11.81	18	1.2
5	208	62	31.83	11.82	11.5	1.6
6	248	55	31.89	11.69	18.7	0.5
10	336	50	32.09	17.79	7.8	2
16	400	69	32.41	19.44	8.1	1.1
17	448	73	32.37	18.97	6.6	
18	500	82	32.75	20.61	3.6	5.3
19	552	80	32.8	20.25	2.7	6.4
20	592	76	32.8	20.53	1.7	11.0
21	656	76	32.94	20.21	3.5	2.5
22	520	77	32.93	20.69	25.3	
24	416	64	32.54	20.35	3.7	2.8
26	332	64	32	16.24	4.3	1.9
27	304	38	32.05	17.8	10	2.6
32	392	64	32.76	19.46	1.6	9.2
33	456	71	32.74	20.4	6.8	0.9
35	340	44	31.91	15.51	8.2	0.3
37	244	48	32.85	11.18	18.1	1.6

St.	NH ₄ (μM)	NO ₃ (μM)	NO ₂ (μM)	DIN** (μM)	Si(OH) ₄ (μM)	PO ₄ (μM)
3	6.23	1.07	0.09	7.39	1.06	0.42
4		1.01	nd	1.01	1.07	0.22
5	2.53	2.46	nd	4.99	0.68	0.22
6	12.73	0.96	nd	13.69	0.81	0.77
10	2.97	0.39	nd	3.36	0.68	0.22
16	4.48	1.12	nd	5.60	1.07	0.17
17	1.27	1.4	nd	2.67	1.2	0.22
18	1.91	0.28	nd	2.19	0.81	0.12
19	5.10	0.25	nd	5.35	0.8	0.1
20	0.69	1.89	nd	2.58	0.94	0.1
21	3.33	0.46	nd	3.79	0.93	0.1
22	24.70	1.18	nd	25.88	1.82	0.1
24	2.62	1.57	nd	4.19	0.8	0.22
26	1.63	0.42	nd	2.05	2.08	0.07
27	5.04	0.22	nd	5.26	0.81	0.17
32	6.25	2.03	nd	8.28	0.55	0.1
33	2.05	0.35	nd	2.40	1.31	0.12
35	0.68	0.32	nd	1.00	1.82	0.12
37	2.19	0.53	nd	2.72	1.06	0.17

*KP: Distance (in km) from the coastal station off Incheon (St. 1 in the 2nd cruise)

**DIN=NH₄+NO₃+NO₂

우 1.0~22.4 mg/l(평균 8.1 mg/l)의 범위를 보였고, 11월 조사에서는 0.5~21.2 mg/l(평균 4.6 mg/l), 그리고 6월 조사에서는 1.6~25.3 mg/l(평균 9.2 mg/l)의 값을 가져(Table 1, 2 and 3) 전체적인 변화 범위는 유사하나 시기별 평균값은 6월 조사에서 가장 큰 값을 보이고 11월 조사에서 가장 낮은 값을 보였다. 한편, 세차례의 조사에서 부유물질 중 유기탄소의 함량은 각각 5월 조사의 경우 0.6~2.1%(평균 1.3%)의 범위를 보였고, 11월 조사에서는 0.6~23.9%(평균 6.9%), 그리고 6월 조사에서는 0.3~11%(평균 3.1%)로써(Table 1, 2 and 3), 11월 조사시 가장 큰 값을 보이고 5월 조사에서 가장 낮은 값을 보이고 있다.

부유물질의 공간적 분포(Fig. 3a)를 보면 5월, 11월 및 6월 조사시기 모두 연안역으로부터 외해역으로 가면서 부유물질의 농도가 감소하고 있어 부유물질의 함량이 주로 육상으로부터의 유입량에 의해 결정되고 있음을 알 수 있다. 한편 부유물질 중 유기탄소의 함량(Fig. 3b)은 부유물질 함량과는 반대로 연안역으로부터 외해역으로 가면서 대체로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 부유물질 중 유기탄소의 공간적 분포는 대체로 부유퇴적물의 함량과는 반대의 경향을 나타내고 있으며, 이는 연안역의 경우 부유퇴적물이 대부분 육상기원의 무기질 광물로 구성되기 때문에 이 성분들에 의한 희석효과로 생각된다. 한편 시기별로 보면 부유물질의 경우 6월 조사시기에 함량이 가장 높고 5월 및 11월 조사시기에는 비슷한 농도 분포를 보이고 있다. 유기탄소의 경우 연안역 및 인접 해역에서는 유기탄소의 시기별 함량 차이가 뚜렷하지 않으나 외해역에서 11월 조사시기에 높은 분포를 보이고 있다. 입자태 유기탄소는 주로 박테리아, 플랑크톤, 미세 플랑크톤 등의 생물체와 생물기원의 퇴적물(organic detritus) 등으로 구성되며(Xiuren *et al.*, 1990) 이렇게 구성된 입자태 유기물은 해수 중으로 침강하여 일부는 해저 퇴적물로 쌓여 생물의 먹이가 되거나 바닥에 퇴적되고, 일부는 수층(water column) 내에서 분해되어 영양염을 재순환시키는(recycling) 작용을 한다(Williams, 1975). 11월 조사시 유기탄소의 함량이 외해역에서 특히 높은 분포를 보이는 것은 봄철에서 여름철에 걸쳐 황해 중동부에 발달한 성층이 가을철로 들어서면서 대기의 냉각효과 및 강한 북서풍의 영향으로 서서히 깨지면서 수층의 수직 혼합이 활발해짐에 따라 성층기간동안 저층으로 침강, 퇴적된 유기물이 재부유된 것으로 사료된다.

영양염의 분포

조사기간 중 관측된 무기 영양염 원소들의 함량은 다음과 같다(Table 1, 2 and 3). 암모니아의 경우 5월 조사에서 ND~10.8 μM(평균 1.4 μM), 11월 조사에서는 4.3~16.1 μM(평균 6.8 μM) 그리고 6월 조사에서는 0.7~24.7 μM(평균 4.8 μM)의 변화 범위를 보였다. 질산염은 5월 조사에서 0.2~9.8 μM(평균 5.4 μM), 11월 조사에서는 ND~20.5 μM(평균 6.5 μM) 그리고 6월 조사에서는 0.2~2.5 μM(평균 0.9 μM)의 변화 범위를 보였다. 한편 아질산염은 5월 조사에서 ND~1.0 μM(평균 0.5 μM), 11월 조사에서는 ND~2.0 μM(평균 0.3 μM)의 변화범위를 보였으며 6월 조사에서는 거의 대부분 정점에서 불검출되었다. 한편 인산염과 규산염 농도는 각각 5월 조사에서 0.3~0.7 μM(평균 0.5 μM) 및 1.0~5.8 μM(평균 3.4 μM)의 범위로 나타났고, 11월 조사에서는 0.1~0.9 μM(평균 0.5 μM) 및 0.5~13.1 μM(평균 7.0 μM)의 범위를 보였으며, 6월 조사에서는 인산염이 0.1 μM 미만~0.8 μM(평균 0.2 μM)의 농도범위를 보이고 규산염은 0.6~2.1 μM(평균 1.1 μM)의 변화 범위를 보였다.

무기 영양염들의 공간적 분포(Fig. 4a, b, c)를 보면 대체로 연안역에서 외해쪽으로 가면서 농도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 암모니아의 경우 11월 조사에서는 외해역으로 가면서 농도가 감소하다가 124°E 부근에서 다시 증가하고 있어 황해 중심 해역에서 또 다른 암모니아 공급원이 있는 것으로 보인다. 질산염과 아질산염 역시 연안역에서 외해역으로 가면서 농

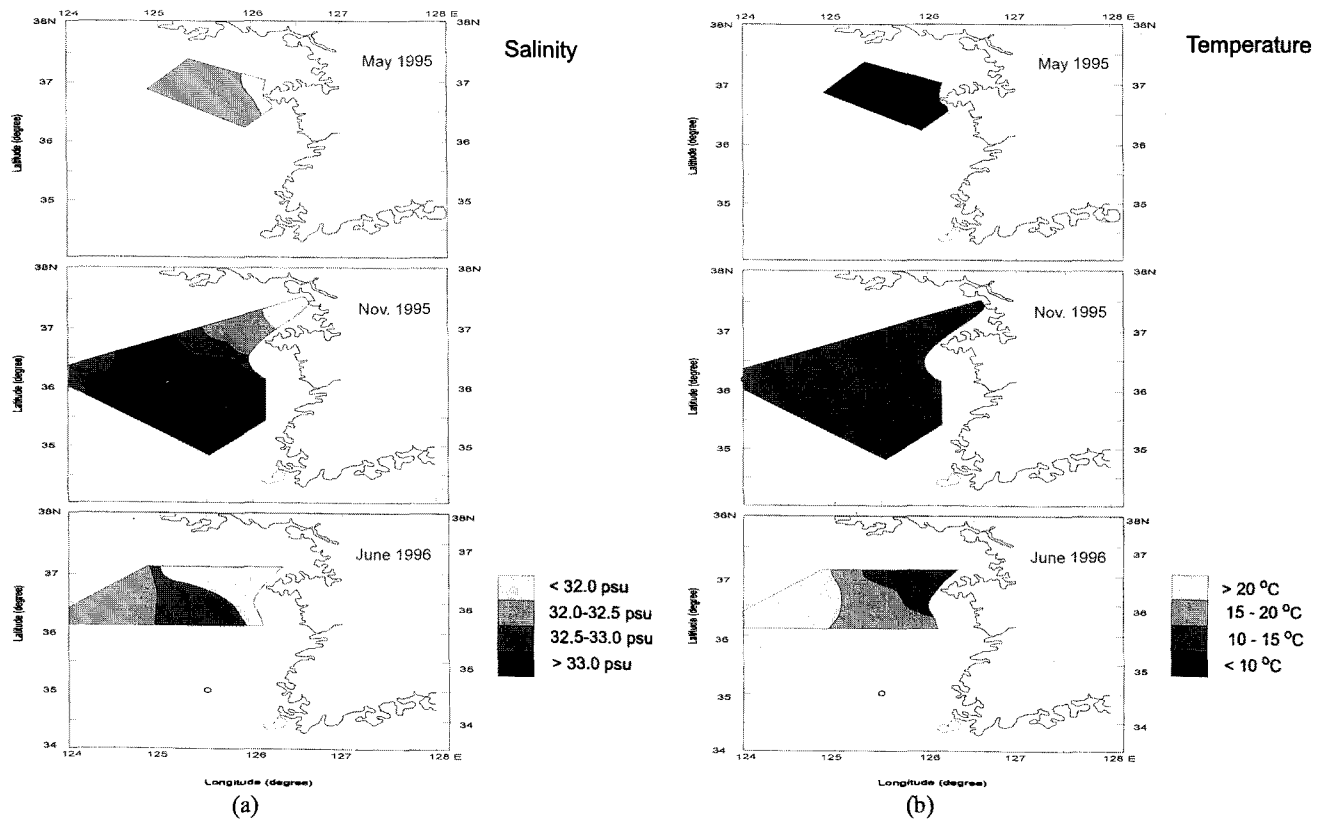


Fig. 2. (a) Spatial and seasonal distribution of salinity in the surface seawater off the west coast of Korea (b) Spatial and seasonal distribution of temperature in the surface seawater off the west coast of Korea.

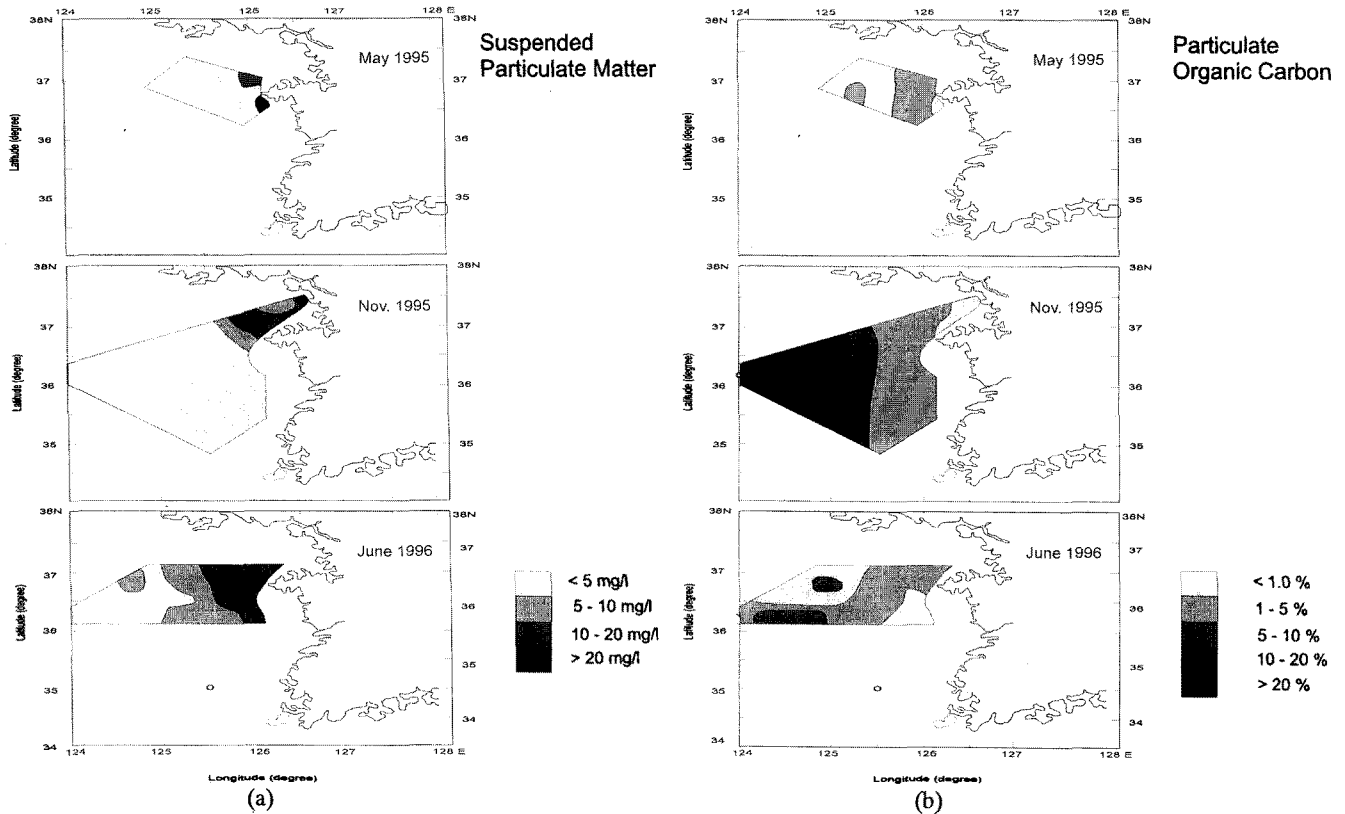


Fig. 3. (a) Spatial and seasonal distribution of suspended particulate matter (SPM) in the surface seawater off the west coast of Korea (b) Spatial and seasonal distribution of particulate organic carbon (POC) in the surface seawater off the west coast of Korea.

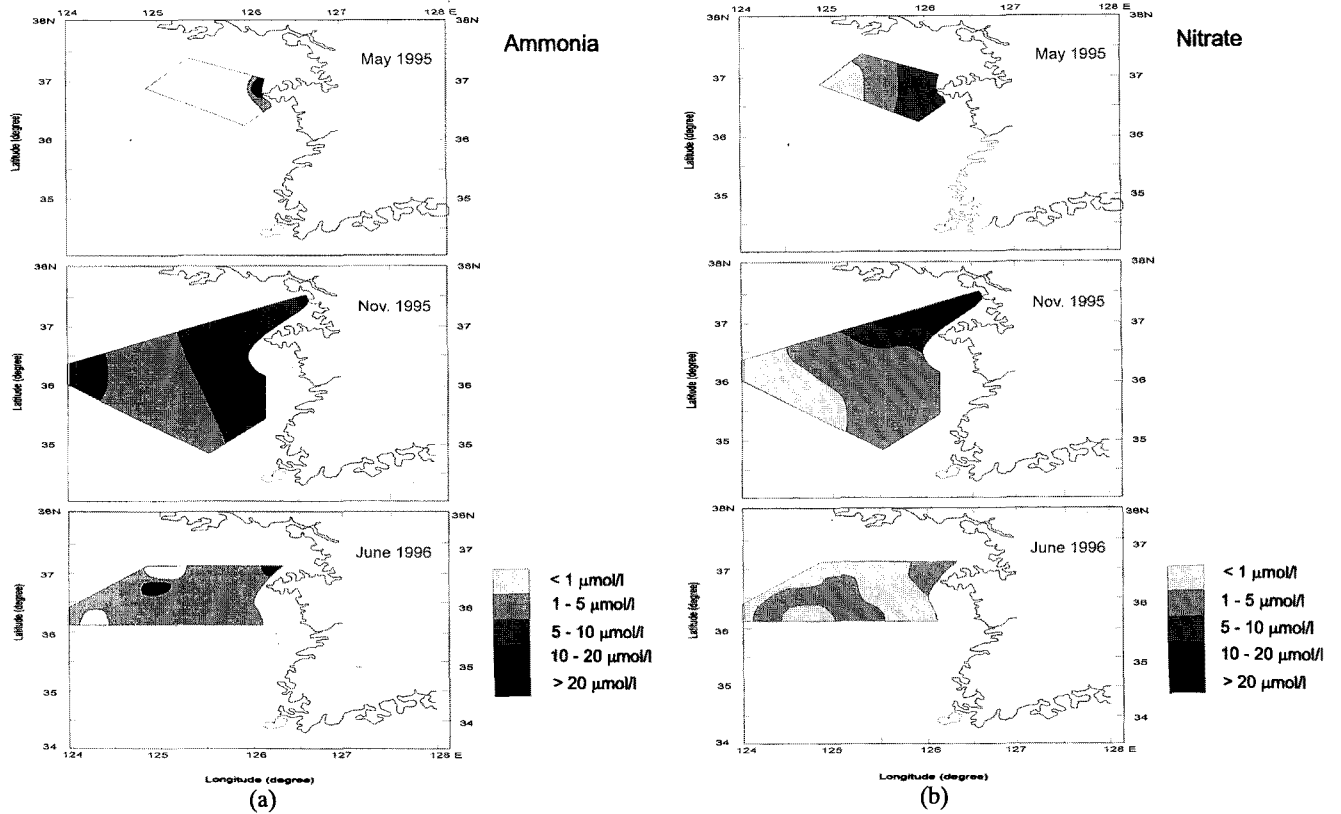


Fig. 4. (a) Spatial and seasonal distribution of ammonia in the surface seawater off the west coast of Korea (b) Spatial and seasonal distribution of nitrate in the surface seawater off the west coast of Korea (c) Spatial and seasonal distribution of nitrite in the surface seawater off the west coast of Korea.

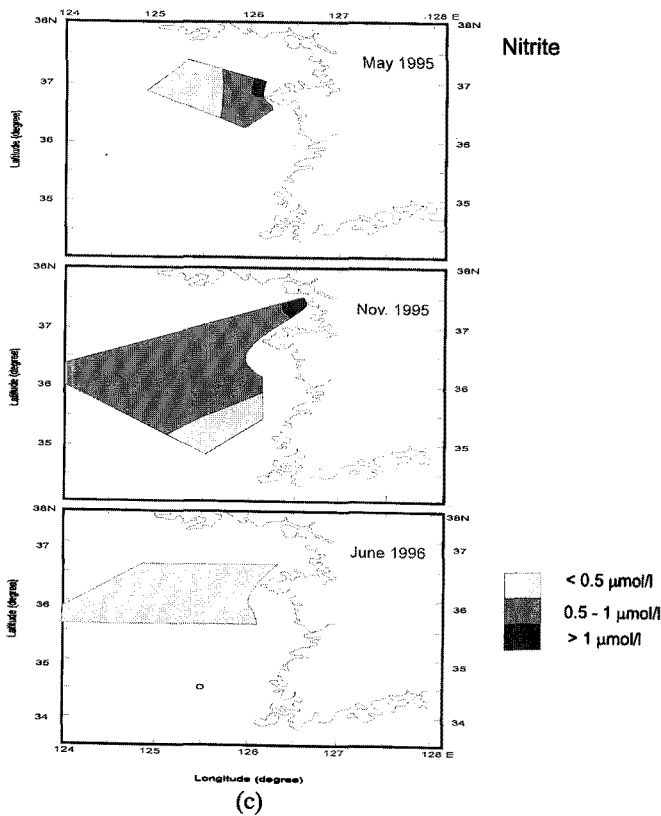


Fig. 4. Continued.

도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이에 따라 암모니아, 질산염 및 아질산염을 합한 용존 무기질소(DIN)의 농도 역시 대체로 연안역에서 외해역으로 가면서 농도가 감소하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 5a). 한편, 시기별로는 암모니아, 질산염, 아질산염 및 DIN(총용존무기질소=암모니아+질산염+아질산염)의 농도가 모두 11월 조사시 가장 높다. 이는 계절적으로 11월 조사시기가 늦가을에 해당되므로, 무기영양염의 주 소비원인 식물플랑크톤의 1차 생산량이 줄어들고, 또 봄에서부터 여름철 동안 황해 중심부에 형성되어 있던 성층구조가 늦가을로 접어들면서 깨지기 시작하여 무기 영양염이 풍부한 저층수가 표층수와 혼합되기 시작한 때문인 것으로 사료된다. 이러한 경향은 인산염과 규산염의 공간적, 시간적 변화(Fig. 5b, c)에서도 비슷하게 나타나 황해 표층수의 무기 영양염 농도분포가 계절적인 생물활동의 변화와 함께 육상으로부터의 공급 및 수층의 성층 여부 등에 의해 결정되는 것으로 생각할 수 있다.

용존 영양염 분포의 조절 요인

해양에서의 영양염 분포는 공급과 소비라는 두가지 측면에서 이해할 수 있다. 영양염의 공급원으로는 육상에서의 풍화에 의한 산물, 유기물의 분해 및 각종 폐수 등이 있으며 소비의 측면에서는 식물 플랑크톤 및 미소플랑크톤 또는 박테리아 등 미생물의 광합성에 의한 것을 들 수 있다. 암모니아는 해양식물의 질소계 영양염으로서 쉽게 이용되어 해수 중에 낮은 농도로 존재하며, 농도 변화가 상당히 빠르게 나타난다(Spencer, 1975).

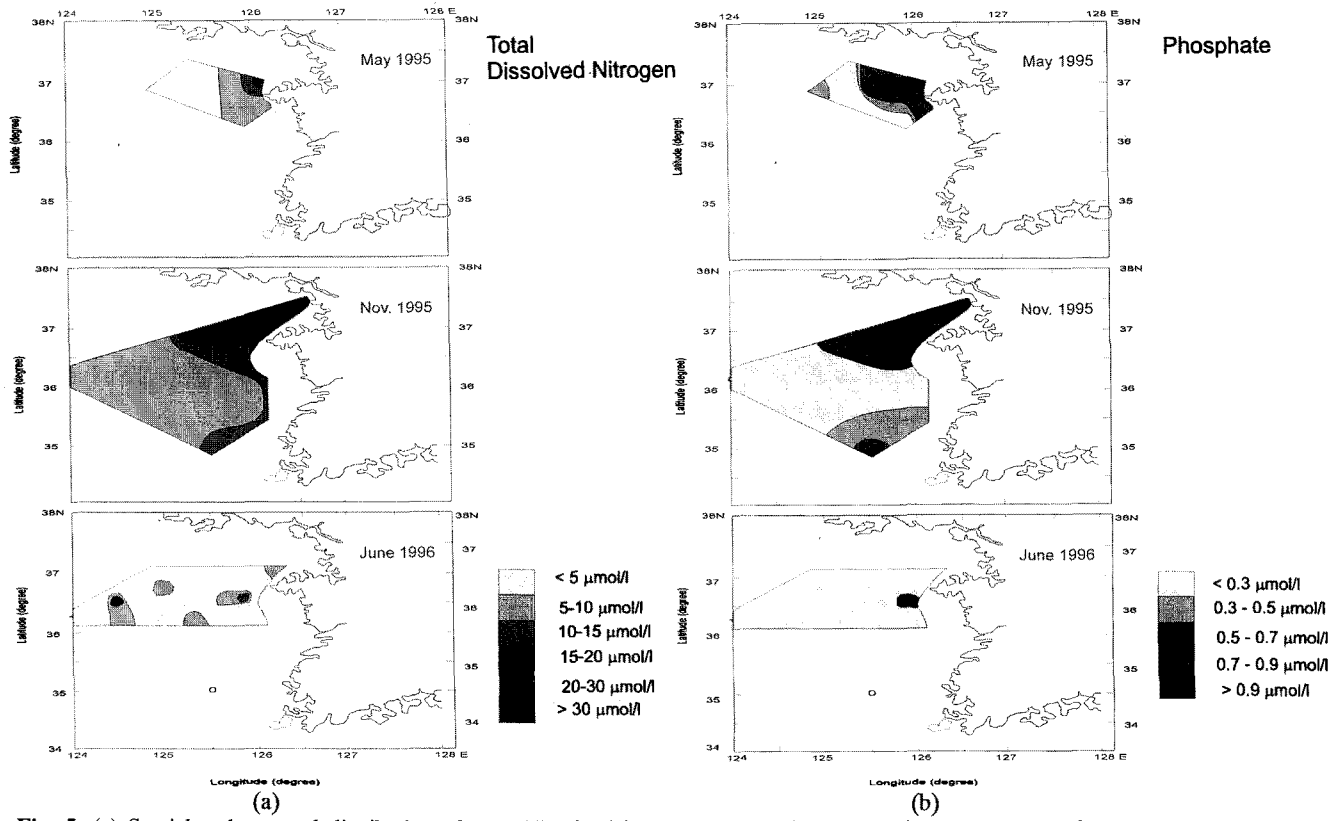


Fig. 5. (a) Spatial and seasonal distribution of DIN (dissolved inorganic nitrogen) in the surface seawater off the west coast of Korea (b) Spatial and seasonal distribution of phosphate in the surface seawater off the west coast of Korea (c) Spatial and seasonal distribution of silicate in the surface seawater off the west coast of Korea.

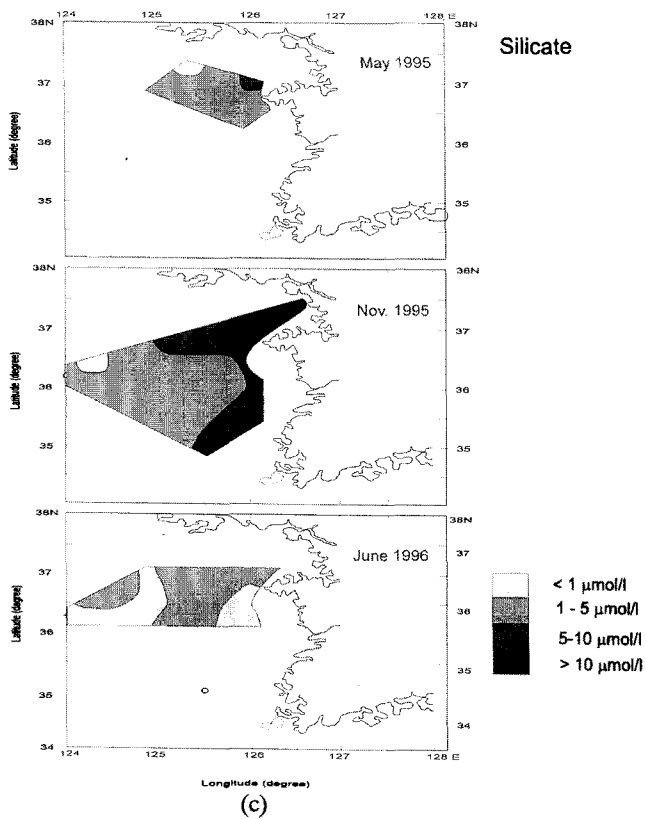


Fig. 5. Continued.

또한 연안역에 분포하는 암모니아의 상당 부분은 주로 공장폐수나 생활하수 등이 대기나 하천을 통해 공급된 것으로 그 농도가 $1.0 \mu\text{M/L}$ 이상인 경우 생물에 의한 소비가 다른 질소계 영양염에 비해 선택적으로 이루어지는 것으로 알려져 있다(Glibert *et al.*, 1982). 한편, nitrite는 가장 불안정한 형태의 용존태 무기 질소로 질산화과정(nitrification) 또는 탈질산화과정(denitrification) 중 일시적으로 거치는 단계이며, 따라서 대부분 해양에서 DIN 중 비율이 가장 작다. 또한 질산염은 암모니아나 아질산염에 비해 비교적 안정된 상태로 대부분의 해양에서 용존태 무기 질소 중 가장 많은 비율을 차지하며, 토양이나 화학비료가 많이 이용되는 농경지와 표층 지각 유출수(terrestrial run-off) 등이 하천을 통해 해양으로 운반되는 nitrate의 중요한 공급원으로 작용한다. 한편, 규산염은 질산염이나 인산염과 같이 인위적인 공급원에 의해서보다는 대부분이 규산질 광물이나 알루미늄-규산질 광물의 풍화작용에 의해 해양으로 공급된다(Martin and Meybeck, 1979). 또한 인산염의 경우 대부분은 지각물질의 풍화산물이나 가정용 세제와 같이 인간활동에 의해 인위적으로 배출된 물질로 구성된다.

황해로 유입되는 영양염의 공급원은 인근 육지로부터 하천수에 의한 유입, 대기로부터의 유입, 해저질로부터의 용출(benthic flux), 수중에서의 재생 및 외해로부터의 유입(쿠로시오) 등이 있다(Glibert, 1982; Shim and Park, 1986; Chung *et al.*, 1989). 질소의 경우 주로 유광대 내에서의 rapid recycling에 의한 재생산이 황해 전체 질소요구량(소모량)의 80% 이상을 공급하여 황

해내 질소의 가장 중요한 공급원 역할을 하는 것으로 보고되었다(해양연구소, 1993; Son *et al.*, 1989).

조사기간 중 총용존무기인(DIN)의 함량과 DIN을 구성하는 무기질소 species(암모니아, 질산염 및 아질산염)의 상대적인 변화는 물리적-생물학적 작용에 기인한 것으로 생물의 계절에 따른 1차 생산량 변화와 호흡작용이나 영양염의 강을 통한 공급 패턴 변화 등의 요인이 복합적인 형태로 영양염 분포에 영향을 미치는 것으로 보인다. 우선, 황해에서 계절에 따른 1차 생산량 변화를 살펴보면, 봄철에 812 mg-C/m^2 , 여름철에 693 mg-C/m^2 , 겨울철에 102 mg-C/m^2 로 계절별 변화가 크게 나타난다(해양연구소, 1993). 따라서 5월에는 풍부한 영양염과 적절한 광조건 그리고 수층이 안정되면서 1차 생산이 최대인 시기로 질소계 영양염 소비가 상대적으로 가장 많다. 따라서 표층수의 영양염은 고갈되는 현상을 초래하게 된다. 이때 생물에 의한 질소계 영양염 이용에 있어서 암모니아가 질산염 보다 선택적으로 많이 소비되고, 암모니아가 $1.0 \mu\text{M/L}$ 이하가 되면 질산염 소비가 본격적으로 이루어지기 때문에(Glibert *et al.*, 1982) 봄철인 5월 조사 시기의 경우 연안역을 제외한 나머지 정점들의 표층수에서는 암모니아가 전반적으로 $1.0 \mu\text{M}$ 이하로 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 황해 중동부 해역의 경우 질산염에 비해 암모니아의 식물플랑크톤 섭취율이 두배 이상을 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다(Shim *et al.*, 1996). 그러나 6월에는 생물의 1차 생산에 의한 영양염 소비가 지속적으로 일어나는 반면 황해 중동부 해역에는 조석전선이 존재하고, 이 조석전선의 외해역에는 표, 저층간 수온차에 의해 계절 수온약층이 강하게 발달한다. 이와 같은 조석전선과 계절 수온약층은 강으로부터 영양염 공급과 저층에서 유기물 분해(mineralization)에 의해 재생산된 영양염 표층 공급을 차단시키며, 따라서 외해역 표층수에는 영양염 고갈 현상이 일어난다. 이와 같은 빈영양(oligotrophic) 환경에서 춘계 식물플랑크톤 대번식기에 증식된 동물플랑크톤 등의 배설물 등이 박테리아에 의해 활발하게 분해됨으로써 상대적으로 암모니아가 증가할 수 있는 것으로 보인다. 대륙붕 해역에서 암모니아의 기원이 대개 동물플랑크톤 등의 배설물이라는(해양연구소, 1993) 보고가 있으며, 본 연구에서 6월 조사시기의 경우 DIN 중 암모니아가 차지하는 비율이 60% 이상이고 질산염이나 규산염의 농도는 암모니아에 비해 매우 낮은 농도($2 \mu\text{mol}$ 미만)로 존재하고 있는 사실로부터 박테리아에 의한 동물플랑크톤 등의 배설물 분해로부터 암모니아가 기원했을 가능성을 있는 것으로 사료된다.

6월 조사시기에 암모니아가 증가하는 또 한가지 가능성으로서 대기 유입의 영향을 들 수 있다. 강수에 의한 황해상 영양염류 연간 침적율은 질산염 $6.8 \times 10^9 \text{ mol}$, 암모니아 $31.1 \times 10^9 \text{ mol}$, 인산염 $0.5 \times 10^9 \text{ mol}$ 및 규산염 $1.0 \times 10^9 \text{ mol}$ 로서 질산염과 인산염, 규산염은 강물에 의한 유입량(질산염, $3.8 \times 10^9 \text{ mol/yr}$; 암모니아, $3.2 \times 10^9 \text{ mol/yr}$; 인산염, $0.3 \times 10^9 \text{ mol/yr}$; 규산염, $0.2 \times 10^9 \text{ mol/yr}$)과 비슷한 범위를 보이나 암모니아는 강물에 의한 유입량에 비해 대기 유입량이 10배 정도 높다(Hong *et al.*, 1997). 6월 조사시기의 N/P ratio는 14~54(평균 29)로서 이 시기에는 인산염이 제한 영양염으로 나타나고 있다. 따라서 전체적으로 성층이 형성되어 표층의 영양염이 고갈된 가운데 대기

를 통해 공급되는 영양염이 광합성에 사용되고, 인산염이 고갈되면서 과량의 암모니아는 그대로 수층에 잔류하여 높은 농도를 유지하는 것으로 볼 수 있다. 또한 $124 \sim 125^\circ\text{E}$ 인근 해역은 지난 몇 년간 식료품 쓰레기 등 유기물 해양 투기가 지속적으로 수행된 지역이기 때문에(환경부, 1996) 인위적인 유입에 따른 농도 증가 가능성도 생각해 볼 수 있다. 한편 11월에는 3회에 걸친 본 연구지역 조사 중 가장 높은 영양염 농도를 보이고 있으며, 전체적으로는 광합성이 활발한 봄철에서 호흡작용이 활발한 겨울철로 가면서 DIN이 증가하고 있는 양상을 보이고 있다. 특히, 암모니아는 5월에 가장 낮은 농도를 보이고 11월로 가면서 증가하는데 이는 봄철 식물 플랑크톤의 대증식기를 통해 생성되었던 유기물이 저층으로 침강하여 분해된 후 다시 늦가을로 들어서면서 수층의 수직혼합이 활발해짐에 따라 표층수에 높은 농도분포를 보이는 것으로 생각된다(Son *et al.*, 1989).

결 론

황해 중동부 해역은 4월~11월 사이에 조석전선과 계절 수온약층이 형성되며, 11월 말경이 되면 성층이 깨지면서 수층이 수직으로 혼합되기 시작한다. 이러한 수층의 물리해양학적 특성은 표층수의 영양염 원소 분포에도 중요한 영향을 주게되며 다음과 같이 요약될 수 있다.

5월, 6월 및 11월의 세차례 실시한 현장 조사에서 표층수의 영양염 농도 분포는 암모니아를 제외하면 일반적으로 6월이 가장 낮고 11월이 가장 높은 값을 보이는 한편, 암모니아는 5월에 가장 낮은 농도 분포를 보이고 11월에 가장 높은 값을 보였다. 봄에 식물 플랑크톤의 1차 생산 활동으로 영양염이 고갈된 외해역의 표층수는 6월로 되면서 수온약층과 조석전선의 발달로 저층과 강으로부터의 영양염 공급이 더욱 제한되나 암모니아의 농도는 5월에 비해 오히려 증가하고 있으며, 이러한 현상은 봄철 식물 플랑크톤 대번식기에 증식된 동물 플랑크톤 등의 배설물이 박테리아에 의해 분해되는 과정에서 암모니아가 수층으로 공급되거나 대기를 통해 유입된 암모니아에 의한 것으로 보인다. 한편, 11월에는 늦가을로 접어들면서 봄-여름철에 형성된 성층이 깨지고 수층의 수직 혼합이 활발해지면서 성층기간 동안 저층수에 축적되었던 영양염 원소들이 표층으로 공급되는 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 교육부 96년도 기초과학 연구소 학술연구 조성비(과제번호 BSRI-96-5409)의 지원에 의해 수행되었습니다. 연구 수행을 위한 시료채취에 많은 도움을 주신 이어도호의 선장님 및 승무원 여러분과 해양경찰청 함정의 승무원 여러분들께도 진심으로 감사드립니다. 끝으로 본 논문의 원고를 검토하고, 세밀하게 지적해주신 두분의 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

이석우, 1992. 한국근해 해상지. 집문당. 337 pp.

- 윤상선, 1994. 수생환경의 영양상태에 따른 식물 플랑크톤과 박테리아의 분포 및 상관관계. 서울대학교 이학석사논문. 116 pp.
- 장 만, 1990. 한국 서해 식물플랑크톤의 생태학적 연구. 서울대학교 이학박사논문. 185 pp.
- 해양연구소, 1993. 한반도 주변 해역의 화학물질 수치 및 순환 연구(서남해역). BSPN 00203-614-4. 321 pp.
- 환경부, 1996. 환경백서. 597 pp.
- Allison, L.E., 1965. Organic carbon. In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, edited by Black, C.A., D.D. Evans, L.E. Ensminger, J.L. White and F.E. Clark., American Society of Agronomy Inc., Madison, U.S.A., 1367-1378 pp.
- Broecker, W.S. 1974. Internal cycling and throughput. In: Chemical Oceanography. New York, Harcourt Brace Jovanovich, 7-8 pp.
- Choi, J.K., 1991. The influence of the tidal front on primary productivity and distribution of phytoplankton in the mid-eastern coast of Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **26**(3): 223-241
- Chung, C.S., J.H. Shim, Y.C. Park and S.G. Park, 1989. Primary productivity and nitrogenous nutrient dynamics in the East Sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **24**(1): 52-61.
- Eppley, R.W. and B.J. Peterson, 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, **282**: 13.
- Fanning, K.A. and M.E.Q. Pilson, 1971. On the spectrophotometric determination of dissolved silica in natural waters. *Anal. Chem.*, **45**: 136-140.
- Glibert, P.M., 1982. Regional studies of daily, seasonal and size fraction variability in ammonium remineralization. *Mar. Biol.*, **70**: 209-222.
- Glibert, P.M., D.C. Biggs and J.J. McCarthy, 1982. Utilization of ammonium and nitrate during austral summer in the Scotia Sea. *Deep Sea Res.*, **29**: 837-850.
- Hong G-H, S.H. Kim and C.S. Chung, 1997. Contamination in the Yellow Sea Proper: A Review. *Ocean Res.*, **19**(1): 55-62.
- KORDI, 1987. Oceanographic Atlas of Korean Waters. Volume I. The Yellow Sea. 147 pp.
- Ivancic, I. and D. Degobbis, 1984. An optical manual procedure for ammonia analysis in natural waters by the indophenol blue method. *Water Res.*, **18**: 1143-1147.
- Martin, J.M. and M. Meybeck, 1979. Elemental mass balance of material carried by major world rivers. *Mar. Chem.*, **7**: 173-206.
- Murphy, J. and J.P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Anal. Chim. Acta*, **27**: 31-36.
- Nakao, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Fac. Mar. Sci. Technol. Tokai Univ. Spec. No.* November, 199-367.
- Parsons, T.R., 1975. Particulate organic carbon in the sea. In: Chemical Oceanography, Vol. 2, edited by Riley, J.P. and G. Skirrow, London, Academic Press, 365-383 pp.
- Pingree, R.D., P.R. Dugh, P.M. Holligan and G.R. Forster. 1975. Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel. *Nature*, **256**: 672-677.
- Pingree, R.D., L. Maddock and E.I. Buttler, 1976. The influence of biological activity and physical stability in determining the chemical distribution of organic phosphate, silicate and nitrate. *J. Mar. Biol. Ass.*, **57**: 1065-1073.
- Seung, Y.H., J.H. Chung and Y.C. Park, 1990. Oceanographic studies related to the tidal front in the Mid-Yellow Sea off Korea: Physical aspects. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **25**(2): 84-95.
- Shim, J.H. and Y.C. Park, 1986. Primary productivity measurement using carbon-14 and nitrogenous nutrient dynamics in the southeastern sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **21**(1): 13-24.
- Shim, J.H., M.G. Park, S.R. Yang and B.C. Cho, 1996. Nitrogen dynamics during the early phase of tidal front formation in the mid-eastern part of the Yellow Sea. *J. International Soc. Yellow Sea Res.*, **2**(1): 15-25.
- Simpson, J.H., P.B. Tett, M.L. Argote-Espionza, A. Edmonds, K.J. Jone and G. Savidge, 1982. Mixing and phytoplankton growth around an island in stratified sea. *Continental Shelf Res.*, **1**: 15-31.
- Son, S.K., K.H. Chung, J.S. Jo and Y.C. Park, 1989. Seasonal variation of nutrients, total dissolved free amino acids and bacterial biomass in the Yellow Sea. *Yellow Sea Res.*, **2**: 1-12.
- Spencer, C.P., 1975. The micronutrient elements. In: Chemical Oceanography, Vol. 2, edited by Riley, J.P. and G. Skirrow, London Academic Press, 245-300 pp.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada 167, 2nd ed., 310 pp.
- Williams, P.J., 1975. Biological and chemical aspects of dissolved organic material in sea water. In: Chemical Oceanography, Vol. 2 edited by Riley, J.P. and G. Skirrow, London Academic Press, 301-363 pp.
- Xiuren, N., G. Cauwet, S. Junxian, C. Zhongyuan, L. Zilin and L. Zhensheng, 1990. Relationships between Chlorophyll a, bacteria, ATP and POC in the Changjiang estuary and the plume. In: Proc. Int. Symp. on the Biogeochemical Study of the Changjiang Estuary and its Adjacent Coastal Waters of the East China Sea, edited by Guohui Y., J.M. Martin, Z. Jiayi, H. Windom and R. Dawson, China Ocean Press, 220-244 pp.