

수괴특성에 따른 춘계 황해의 영양염 분포 특성

김경홍 · 현정호* · 이재학¹ · 신경순² · 배세진² · 유신재² · 정창수³

한국해양연구소 심해저자원연구센터, ¹해양물리연구단,
²해양생물연구단, ³해양화학연구단

Springtime Distribution of Inorganic Nutrients in the Yellow Sea: Its Relation to Water Mass

KYEONG-HONG KIM, JUNG-HO HYUN*, JAE-HAK LEE¹, KYUNG-SOON SHIN²,
SE-JIN PAE², SIN-JAE YOO² AND CHANG-SOO CHUNG³

Deep-Sea Resources Research Center, ¹Physical Oceanography Division, ²Biological Oceanography Division, and ³Chemical Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

춘계 황해에서 해수의 물리적 특성과 연관된 영양염 분포양상을 파악하기 위해 1996년 4월에 한국과 중국연안을 포함하는 황해내 약 40정점에서 수온, 염분, 무기영양염류 및 엽록소-*a*(Chl-*a*)의 분포양상을 조사하였다. 춘계의 조사해역내 수괴는 연안수, 황해난류수, 양자강희석수로 분류되었으며 수괴들은 수직적인 혼합이 잘 이루어진 동계의 특성을 나타내 저층에서 표층으로의 영양염 공급이 원활히 일어나는 것으로 나타났다. 표층으로의 영양염 공급과 호전된 광조건으로 야기된 식물플랑크톤 대증식은 표층수에서 영양염을 고갈시켜 영양염의 수직적인 농도구배를 형성하였다. 춘계에는 양자강희석수의 세력약화로 고온, 고염의 황해난류수가 황해 중앙해역으로 유입되어 황해 중앙해역의 저층에 존재하는 낮은 영양염 농도(정점 D9, 질산염: <2 μM , 인산염: <0.3 μM)에 영향을 미치고 있었으며, 중국 및 한국연안의 높은 영양염농도는 하천의 유입과 조석에 의한 수직혼합의 영향으로 높은 영양염 농도를 나타내는 연안수의 분포와 연관되어 있었다. 지역적인 조석전선의 형성(정점 D6)은 영양염의 이동을 제한하여 수평적인 영양염 분포에 영향을 미치는 한편, 전선수역의 높은 식물플랑크톤의 생체량(Chl-*a*=12.38 $\mu\text{g}\text{L}^{-1}$)은 표층수에서 영양염을 고갈시켰다. 결론적으로 춘계 황해는: (1) 광역적으로는 영양염의 농도가 낮은 황해난류수의 유입과 영양염 농도가 높은 한국 및 중국연안의 연안수의 분포에 의해 영향을 받으며 (2) 지역적으로는 수직적인 수괴의 혼합, 식물플랑크톤의 서식분포, 그리고 조석전선이 영양염 분포에 영향을 미치고 있었다.

Inorganic nutrient concentrations in relation to springtime physical parameters of the Yellow Sea were investigated during April 1996. Three major water masses, i.e., the Yellow Sea Warm Current Water (YSWC), Coastal Current Water (CCW) and Changjiang River Diluted Water (CRDW), prevailed in the study area. Water masses were vertically well mixed throughout the study area, and nutrients were supplied adequately from bottom to surface layer. As result of ample nutrients supplied by vertical mixing together with progressed daylight condition, springtime phytoplankton blooms were observed, which was responsible for the depletion of inorganic nutrients in surface water column. Low nutrients concentration in bottom water of the central Yellow Sea (Stn. D9; nitrate: <2 μM , phosphate: <0.3 μM) was associated with the entrance of YSWC which is characterized by high temperature and salinity. Influenced by runoff and vertical tidal mixing, CCW with high nutrient concentrations probably associated with China and Korea coastal waters with high nutrients concentration. For the local scale of inorganic nutrient distribution, nutrient transfers from coast to central areas were limited due to restriction imposed by tidal fronts (Stn. D6) and thus affected the horizontal nutrient profiles. Relatively high phytoplankton biomass was observed in the tidal front (Chl-*a*=12.38 $\mu\text{g}\text{L}^{-1}$) during the study period. Overall, the springtime nutrient distribution patterns in the Yellow Sea appeared to be affected by: (1) Large-scale influx of YSWC with low nutrient concentrations and CCW with high nutrient concentrations influenced by Korea and China coastal waters; (2) vertical mixing of water mass and phytoplankton distribution; and (3) local-scale tidal front as well as phytoplankton blooms along the tidal front.

*Corresponding author: jhhyun@kordi.re.kr

서론

영양염류는 여러 해양환경에서 서식하는 식물플랑크톤의 생장을 제한하여 식물플랑크톤의 조성 및 생산력의 시간적, 공간적 분포에 영향을 주는 중요한 화학적 환경요인으로(Howarth, 1988; Mackey *et al.*, 1995; Taylor *et al.*, 1995) 해양의 생태계를 파악하는데 있어 중요한 정보를 제공한다. 연안환경에서 영양염의 유입은: (1) 하천수에 의한 유입(Zhang, 1996), (2) 재광물화 작용을 거쳐 해저퇴적층으로부터의 확산 등에 의한 유입, (3) 외양수로부터의 유입(Hong, *et al.* 1995)을 들 수 있다. 이들 유입된 영양염류들은 일차 생산자인 식물플랑크톤의 분포에 직접적인 영향을 준다(Perkins, 1974; Howarth, 1988; Mingazzini *et al.*, 1990; Taylor *et al.*, 1995; Cha *et al.*, 1998).

해양에서 영양염류의 공간적인 분포는 크게 물리적 인자와 생물적 인자에 의해 조절된다. 물리적인 요인들로서는 해류, 조석전선 및 수괴의 혼합 등이 있다(Pingree *et al.*, 1975; Simpson *et al.*, 1982; Choi, 1991). 해류는 여러 기원으로부터 유입되는 영양염을 공간적으로 재분포시키며 조석이 강한 해양환경에서는 외양과 연안역 사이에 형성된 조석전선이 영양염의 이동과 분포에 영향을 준다고 보고되었다(Choi, 1991; Choi *et al.*, 1995). 한편, 생물적 요인인 식물플랑크톤의 분포 또한 영양염의 공간적 분포를 결정하는 주요인으로 보고되었다(Broecker, 1974; Chester, 1990; Libes, 1992). 이와관련, Gong *et al.*(1996)과 Shen(1996)은 하천의 유입, 해류의 특성과 더불어 식물플랑크톤의 분포가 영양염의 공간적 분포에 영향을 주는 것으로 보고하였다.

계절변동성이 큰 온대 몬순기후에 속하는 황해는 수층의 계절적인 특성이 뚜렷하게 나타난다(과학기술처, 1992). 하계에는 성층이 발달해 표층수에는 영양염의 유입이 거의 없어 고갈되지만 저층수는 표층에서 유입되는 유기물의 재광물화 작용으로 영양염의 축적이 일어나 영양염의 농도가 증가한다. 추계에는 성층이 약해지지만 표층수의 영양염의 유입이 제한되어 표층수에는 여전히 영양염이 고갈되어 있으며 저층수에는 계속 영양염의 축적이 일어나 높은 농도를 나타낸다. 동계에는 강한 북서풍에 의한 냉각 효과로 저층수와 표층수간의 혼합이 일어나 수직적으로 균일한 수괴특성을 나타낸다(과학기술부, 1998). 한편 춘계에는 일반적으로 황해난류수의 유입으로 황해내 여러 화학인자들이 공간적으로 재분포되며, 수괴가 아직 동계의 특성을 지니고 있어 수직적으로 비교적 균일한 수층구조를 나타낸다. 수직적인 수괴의 혼합이 용이해 표층수로 영양염의 공급이 저층수로부터 원활히 일어나며, 표층수에는 저층수로부터 공급되는 풍부한 영양염과 일사량의 증가로 인한 식물플랑크톤의 대증식으로(과학기술처, 1992; 과학기술부, 1998) 무기영양염의 고갈이 야기된다(Harris, 1986; Millero and Sohn, 1992). 따라서 춘계 황해의 영양염 분포를 이해하기 위해서는 수괴특성, 조석전선 등과 같은 물리적 요인의 파악과 더불어 생물적 요인인 식물플랑크톤의 분포를 파악하는 것이 중요하다.

황해에서 영양염의 분포에 관한 많은 연구가 있었으나(Huanxiang and Zhiliang, 1985; Lee, 1990; Choi *et al.*, 1995; Shen, 1996; Cha *et al.*, 1998) 동계에서 하계로 전이되는 시점에서 황해난류수의 영향이 존재하고 있으며 식물플랑크톤의 대증식이 발생하는 등, 물리·생물학적 요인이 복잡하게 얽혀있는 춘계의 영양염 분포양

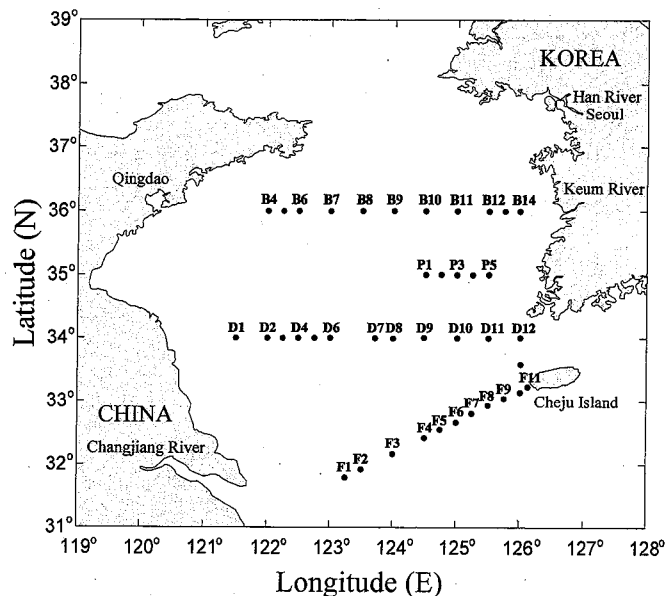


Fig. 1. Sampling stations in the Yellow Sea, April 1996.

상에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다(과학기술처, 1991; 1992; 1996; 과학기술부, 1998). 따라서 본 논문에서는 특히, 4월 황해내 (1) 황해난류수의 유입에 따른 영양염의 광역적 분포특성과 (2) 조석전선 및 식물플랑크톤의 분포와 연관된 지역적 분포특성을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구는 1996년 4월 6일~15일 사이에 한·중 황해공동연구의 일환으로 이루어졌다. 조사해역은 31°80'~36°00'N, 121°50'~126°00'E 범위이며 4개의 측선(B, D, F, P)의 40개 정점에서 현장 조사를 하였다(Fig. 1). 수온과 염분도는 CTD(SBE, 911 plus)를 이용해 각 정점에서 자료를 획득하였다. 엽록소-*a*(Chl-*a*)의 농도는 CTD에 부착된 형광계(Fluorometer, Sea Tech.)를 이용해 획득한 형광값을 아세톤으로 직접 추출하여 분석한 값(Parsons *et al.*, 1984)으로 보정하였다.

영양염 분석을 위한 해수시료는 Rosette에 부착된 5 L Niskin 채수기를 이용해 3~7개의 표준깊이에서 채수 하였다. 채수된 해수는 미리 10% 염산으로 세척한 후 3차 증류수로 씻어낸 60 ml 플라스틱병(HDPE, Nalgene)에 담아 냉동보관(-20°C)하였다가 실험실로 옮긴 후 분석하였다. 용존 영양염들(질산염, 인산염, 규산염)은 실험실에서 영양염 자동분석기(Technicon, Auto Analyzer II)를 이용해 Parsons *et al.*(1984)의 방법에 따라 분석하였다.

결과

측선 B(Fig. 2)에서 수온과 염분은 4.56~8.51°C, 31.41~33.34 psu의 범위로 나타났으며 황해 중앙해역에서 중국 연안(정점 B4)과 한국 연안(정점 B14)으로 갈수록 수심이 얕아지면서 표층 수온과 염분이 감소하였다(Fig. 2a, b). 정점 B8에서 7.5°C의 수온과 33.00 psu 이상의 염분을 함유하는 수괴가 존재하며 이 수괴는 상

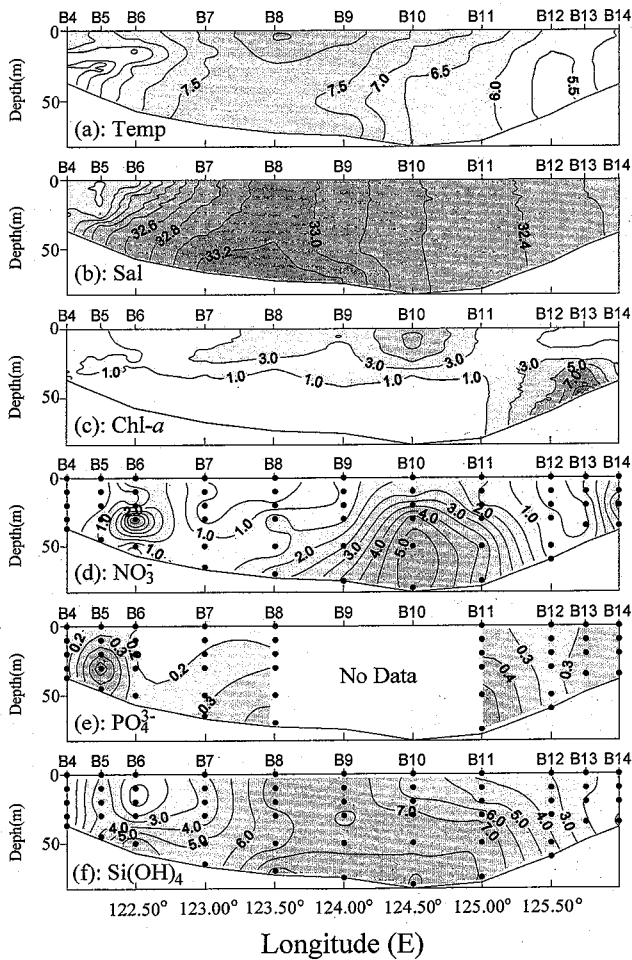


Fig. 2. Vertical distributions of (a) temperature, °C, (b) salinity, psu, (c) chlorophyll-*a*, µg/L, (d) nitrate, µM, (e) phosphate, µM, and (f) silicate, µM in the section B (36°N) of study area.

대적으로 다른 정점들에 비해 고온, 고염의 성격을 띠었다. Chl-*a* 는 0.02~8.03 µg/L⁻¹의 범위를 가지며 정점 B10의 표층과 정점 B13의 저층에서 7.00 µg/L⁻¹ 이상의 높은 농도가 나타났다. 이 값은 다른 계절에 조사된 값보다 10배 이상 높은 값이다(과학기술부, 1998). 정점 B7에서 정점 B10까지는 해수 표층에 Chl-*a*의 농도가 높았고 수심이 깊어지면서 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 2c).

용존 영양염류 질산염의 농도범위는 0.11~5.43 µM 이었고 특히, 정점 B10의 표층에서 2.0 µM 이상이며 저층에서 5.00 µM 이상으로 주위 정점들 보다 높게 나타났고 연안으로 갈수록 농도가 점차 감소하였다. 육지와 가까운 정점 B6, B14에서 높은 농도가 나타났지만 정점 B7, B8, B12의 표층은 거의 고갈되었으며 저층에서도 1.00 µM 이하의 낮은 농도로 나타났다(Fig. 2d). 인산염은 0.05~0.71 µM의 농도범위를 보였으며 B7, B8과 B12에서 0.20 µM 이하의 낮은 값을 나타냈다(Fig. 2e). 규산염은 0.59~9.42 µM의 농도범위를 나타냈으며 정점 B8과 B9에서 농도가 7.00 µM 이상이며 연안 쪽으로 가면서 농도가 감소하였다(Fig. 2f). 이들 영양염류들의 농도 범위는 다른 계절에서 조사된 농도범위와 비교해 보면 동계에 조사된 값보다는 높은 값을 보이고 하계와 춘계에 조사된 값보다는 낮은 값을 나타냈다(과학기술부, 1998).

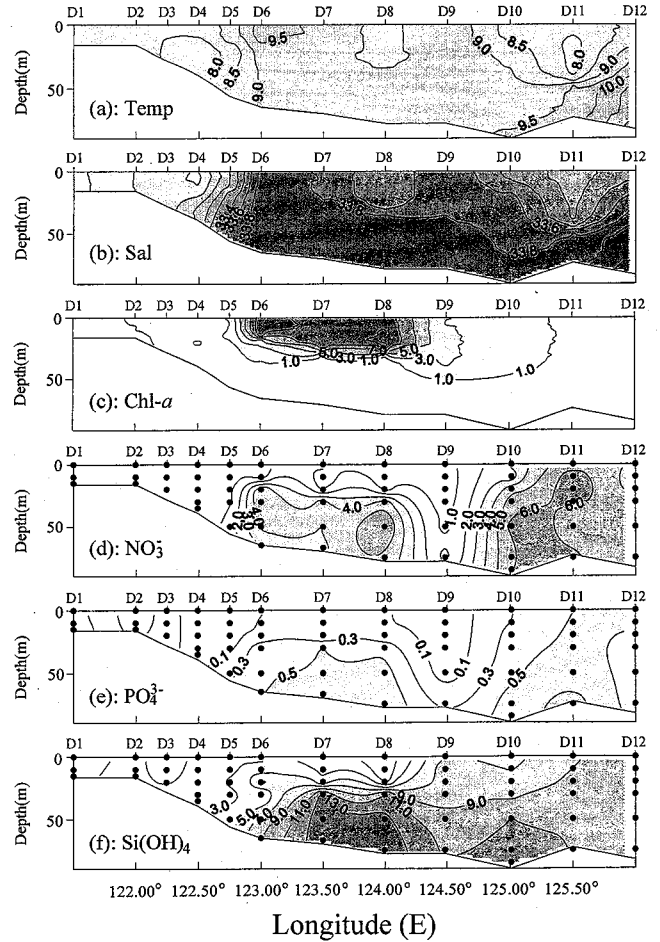


Fig. 3. Vertical distributions of (a) temperature, °C, (b) salinity, psu, (c) chlorophyll-*a*, µg/L, (d) nitrate, µM, (e) phosphate, µM, and (f) silicate, µM in the section D (34°N) of study area.

측선 D에서(Fig. 3) 수온은 7.05~11.35°C, 염분은 32.17~34.41 psu의 범위로 나타났다. 황해 중앙해역(D6, D7, D8, D9)은 고온, 고염의 수괴가 형성되었고 중국연안에 위치한 정점들(D1, D2, D3)과 한국연안에 위치한 정점들(D11, D12)의 표층은 저온, 저염의 특성을 지니는 수괴가 분포하였다. 황해 중앙해역은 전 수심에 걸쳐 수온이 0.50°C, 염분이 0.40 psu 정도의 작은 차이만을 나타냈다(Fig. 3a, b). Chl-*a*는 0.02~12.38 µg/L⁻¹의 농도범위를 가졌으며 정점 D6에서 D8까지의 표층에서는 식물플랑크톤의 대증식으로 9.00 µg/L⁻¹ 이상의 매우 높은 농도가 나타났다(Fig. 3c). 이 값들은 다른 시기에 조사된 수치(<0.6 µg/L⁻¹; 과학기술부, 1998)들 보다 높은 값이다. 질산염은 0.08~6.77 µM, 인산염은 0.05~0.79 µM, 규산염은 0.25~14.20 µM의 농도 범위를 나타냈다. 정점 D6에서 D8(황해 중앙해역)까지의 저층과, 정점 D10에서 D11까지의 한국연안에서 질산염이 6.00 µM, 인산염이 0.50 µM, 그리고 규산염이 11.00 µM 이상의 높은 값을 나타냈다. Chl-*a*의 농도가 높은 정점 D6에서 D9까지의 표층과 정점 D1에서 D5까지는 세 종류의 영양염이 모두 낮은 농도(질산염: <1.0 µM, 인산염: <0.3 µM, 규산염: <3.0 µM)를 유지하고 있었다(Fig. 3d, e, f). 정점 D9에서 질산염과 인산염의 농도가 주위의 정점들보다 전 수심에서 낮게 나오

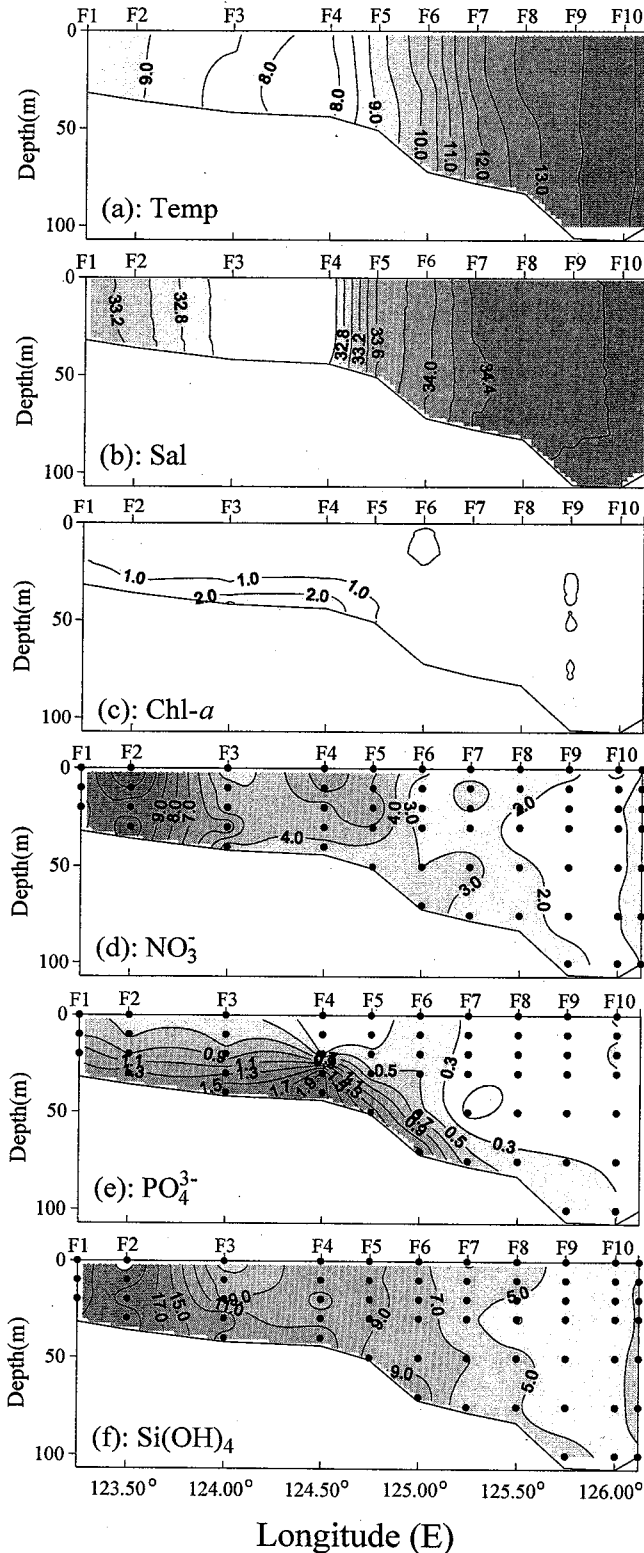


Fig. 4. Vertical distributions of (a) temperature, °C, (b) salinity, psu, (c) chlorophyll-*a*, µg/L, (d) nitrate, µM, (e) phosphate, µM, and (f) silicate, µM in the section F (31.79°N, 123.25°E-33.23°N, 126.12°E) of the study area.

있었다. 이들 영양염류들의 농도 범위는 동계에 조사된 값보다는 높았고 하계와 춘계에 조사된 값보다는 낮은 값을 나타냈다(과학

기술부, 1998).

측선 F(Fig. 4)에서 수온과 염분은 7.82~14.28°C, 32.49~34.67 psu의 범위로 나타났다. 황해난류수가 유입되는 제주도 연안의 정점 F9과 F11 사이에서 높은 수온과 염분값을 나타냈으며 양자강의 영향을 받으며 수심이 얇은 정점 F1과 F4 사이에서 낮은 값을 나타냈다. 각 정점들은 수심에 따른 수직적인 변화가 나타나지 않는 전형적인 동계의 특성을 지니고 있었다. 정점 F4에서 정점 F7까지 수온의 차이가 4.00°C, 염분의 차이가 1.80 psu 이상 크게 나타났다(Fig. 4a, b). Chl-*a*는 0.29~2.84 µg/L의 농도범위를 가지고 정점 F3과 F4의 저층에서 2.00 µg/L 이상의 값을 나타냈으며, 정점 F7에서 F10사이에는 1.00 µg/L의 낮은 값이 전 수심에 고르게 분포하고 있었다. 이 값들은 측선 B와 측선 D에서 나타난 값보다는 낮지만 다른 계절에 조사된 값과는 비슷하거나 높다(과학기술부, 1998). 질산염은 0.55~12.40 µM, 인산염은 0.04~1.98 µM, 규산염은 2.70~22.24 µM사이의 농도범위로 나타났다. 질산염과 규산염은 양자강의 영향을 받는 중국 연안의 정점 F1과 F2에서 각각 9.5 µM, 19.00 µM 이상의 높은 농도를 나타냈고, 황해난류수가 유입되는 제주도 연안의 정점 F9과 F10에서 각각 2.00 µM, 5.00 µM 이하의 농도를 보였다(Fig. 4d, f). 인산염은 정점 F4의 저층에서 1.90 µM 이상의 값을 나타냈고 정점 F9과 F10사이에는 0.10 µM 이하의 낮은 값을 나타냈다(Fig. 4e). 영양염의 농도 분포는 정점간의 많은 차이를 보였고 저온, 저염의 특성을 지닌 양자강 근방의 정점(F1, F2)들에서 높은 영양염 농도를 보인 반면 고온, 고염의 수괴특성을 지니는 제주도 근방의 정점(F9, F10)들에서는 낮은 농도를 보였다.

토 의

광역적인 분포특성

황해내 수괴는 일반적으로 황해난류수(YSWC, Yellow Sea Warm Current), 황해냉수(YSCW, Yellow Sea Cold Water), 양자강희석수(CRDW, Changjiang River Diluted Water), 연안수(CCW, Coastal Current Water) 등 네 가지로 분류된다(Lie, 1984). 또한 황해는 지리적으로 계절풍지역에 위치하며 강한 조석의 영향을 받아 수문학적으로 매우 복잡한 양상을 나타낸다(Lee, 1990; Choi *et al.*, 1995). 동계에는 북서 계절풍에 의한 강한 대기의 냉각효과로 수층 전체가 혼합되어(Nakato, 1977) 황해냉수는 형성되지 않고 양자강희석수의 세력이 약해 황해난류수가 황해로 유입된다(과학기술처, 1996). 하계에는 강한 태양 복사열로 인해 계절적 수온약층이 형성되어 수직적인 혼합이 제한되며 저층에 황해냉수가 형성된다. 강수량의 증가로 육상기원 물질의 유입이 증가하고 연안수와 양자강희석수의 세력이 커져(Park, 1986; Kim *et al.*, 1991; Gong *et al.*, 1996) 황해난류수의 유입이 차단된다. 춘계는 동계에서 하계로 전이되는 기간으로 동계의 잘 혼합된 수괴가 북동 계절풍의 약화와 수온의 상승으로 성층이 되기 시작한다(Lee, 1990).

본 조사에서 4월의 황해내 수괴의 분포특성은 수온-염분 상관도(T-S diagram)로 더욱 명확히 규명된다(Fig. 5). 황해난류수는 고온 고염의 특성을 보였고 중국 및 한국연안수는 저온, 저염의 특성을 나타냈다. 황해 중앙해역은 염분 및 수온의 분포상 황해난류수와 연안수 사이에 위치하며 황해난류수가 연안수와 혼합되는 과

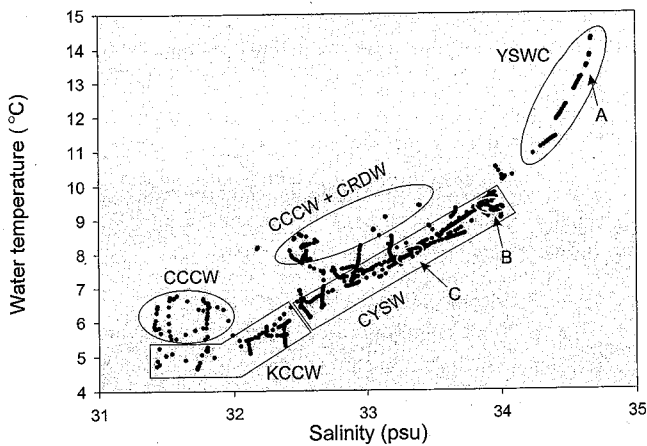


Fig. 5. Temperature-Salinity diagram of the Yellow Sea Warm Current (YSWC), Changjiang River Diluted Water (CRDW), Korea Coastal Current Water (KCCW), China Coastal Current Water (CCCW), Central Yellow Sea Water (CYSW) observed in lines B, D, and F, April 1996 (A: water mass of Stn. F9, F10, B: water mass of Stn. D9, and C: bottom water of Stn. B8).

정도로 사료되며(Fig. 5) 수직적인 성층이 일어나지 않은 동계의 특징을 유지하고 있었다(Fig. 2a, 3a, 4a). 양자강희석수(정점 F1~F4)는 황해로 유입되고 있는 것으로 사료되나(Fig. 4a, b, 6a) 세력이 약해 황해 중앙해역에는 그 영향이 적은 것으로 나타났다(Fig. 5). 수온과 염분의 수평분포도에서 9°C의 등수온선과 33.40 psu 등염분선이 표층에서 제주도 근해로부터 황해 중앙으로 뻗어 있고 수심 50 m에서는 33.40 psu 등염분선이 표층보다 더 높은 위도까지 올라가 있음을 볼 수 있었다(Fig. 6a, b, 7b). 이는 고온, 고염의 황해난류가 제주도 서방해역에서 황해골(과학기술처, 1992)을 따라 북상하고 있음을 말해준다(Nitani *et al.*, 1972; Beardsley *et al.*, 1985; 과학기술처, 1995). 황해 중앙해역은 북상하는 황해난류와 중국 및 한국연안수가 혼합되어 만들어진 수괴로 사료된다.

표층수내 영양염의 수평적 분포에서 양자강희석수가 위치한 양자강 근방의 중국 연안(정점 F1, F2)이 가장 높은 농도를 나타냈고 한국연안수가 유입되는 정점 D11, D12에서도 높은 농도를 나타냈다. 이들 수괴의 높은 영양염은 양자강과 한반도의 강들에 의한 유입에 기인된 것으로, 대체로 이들 하천들의 연간 영양염 유출량은 양자강에서 질산염이 30.5×10^9 mol, 인산염이 0.53×10^9 mol, 규산염이 88.2×10^9 mol이고(Zhang, 1996), 한국연안(한강, 금강, 그리고 영산강)에서 질산염이 1.47×10^9 mol, 인산염이 0.3×10^9 mol, 규산염은 0.4×10^9 mol으로 보고되었다(Hong, 1988).

제주도 서방해역에 위치하고 있는 정점 F9, F10에서 주위보다 낮은 영양염 농도를 나타냈고(Fig. 4, 6) 측선 D에서 황해골에 위치하고 있는 정점 D9에서는 고온, 고염의 특성을 지니는 수괴가 깊은 수심에서도 낮은 영양염 농도를 나타냈다(Fig. 3d, e, 7d, e). 이는 낮은 영양염 농도를 지닌 황해난류수가 황해 중앙으로 간헐적으로 유입되고 있음을 시사하고 있다(Hu, 1990; Lie and Cho, 1997). 또한 측선 B의 정점 B7, B8의 저층에 33.2 psu 이상의 염분을 지니는 수괴가 낮은 질산염 농도를 보인 것(Fig. 2b, d)도 고온, 고염, 낮은 영양염 농도의 특징을 지니는 황해난류수의 영향으로 사료된다. 결론적으로 4월에 황해난류는 정점 F9, F10에서

시작하여 정점 D9를 거쳐 정점 B8의 저층으로 유입(Fig. 5)되면서 황해 중앙해역의 영양염 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 즉, 영양염의 농도가 낮은 황해난류수의 유입에 의해 황해 중앙해역의 영양염 농도가 희석되는 것으로 나타났다. 일반적으로 양자강희석수와 한국연안수가 황해의 영양염 분포에 영향을 미치는 중요한 요인으로 나타나고 있으나 4월의 황해 중앙해역에서는 양자강희석수의 영향이 적은 반면 중국 및 한국연안수와 황해난류수의 유입이 영양염의 광역적인 분포를 결정하는 주요한 요인으로 나타났다.

지역적인 분포특성

수괴혼합과 식물플랑크톤의 영향: 측선 B와 측선 D의 황해중앙해역에서 영양염류의 수직분포와 Chl-*a*의 수직분포를 비교해보면, 표층에서 영양염이 고갈된 수심에서 Chl-*a*의 농도가 높게 나타났고 Chl-*a*의 농도가 감소하는 수심이하에서 영양염의 농도가 증가함을 볼 수 있었다(Fig. 2c, 3c). 수평분포에서도 황해 중앙해역의 표층수에서 영양염 고갈 현상을 볼 수 있었다(Fig. 6c). 일반적으로 중위도 봄철 연안에는 풍부한 영양염을 포함하고 있는 동계의 혼합된 수괴와 수온의 상승으로 인해 식물플랑크톤의 봄철 대증식이 발생한다(Stowe, 1979). 북반구에서 식물플랑크톤의 봄철 대증식은 수괴의 성층이 발달되기 전에 일어나며 북위 35도의 경우, 대증식은 3~4월에 발생하고 영양염의 고갈과 포식자의 활동으로 늦봄이나 이른 여름에 사라지는 것으로 보고되고 있다(Harris, 1986). 하계에서 추계까지 저층으로 유입된 유기물이 분해되어 저층수에는 영양염류가 축적이 된다. 특히, 정점 B10은 유기폐기물의 투기장으로 1998년 이후 계속적인 투기활동이 있었고 투기된 양이 과다해 저층에 영양염의 축적의 효과가 증가한다고 보고된 지역이기도 하다(Park and Choi, 1993; Park *et al.*, 1998; 해양수산부, 1998). 투기의 효과에 대한 명확한 증거는 나타나지 않지만 인간활동에 의한 저층으로의 유기물 유입이 늘어나고 있으며 이는 저층수에 영양염 축적의 증가를 가속화시킬 것으로 사료된다. 동계기간동안 수괴의 수직적인 혼합으로 인해 축적된 영양염류는 표층수로 유입이 원활히 일어나 수괴 전체가 균일하게 된다(과학기술부, 1998). 4월의 황해 중앙해역의 수괴는 아직 동계의 성격을 띠고 있어 수직적인 혼합이 잘 되어 있었다. 따라서 저층수로부터의 영양염 공급이 원활하고 호전된 광조건이 합쳐져 표층수에 식물플랑크톤 대증식이 발생하게 된다(Stowe, 1979; Harris, 1986). 측선 B의 중앙해역 표층에서 나타나는 식물플랑크톤의 농도가 평균 $3.69 \mu\text{gL}^{-1}$ 이고 측선 D의 표층에서는 $6.57 \mu\text{gL}^{-1}$ 이상으로 나타났다. 이 값들은 Choi *et al.*(1995)의 추계에 측정된 값($0.16 \sim 3.20 \mu\text{gL}^{-1}$, 평균 $0.69 \mu\text{gL}^{-1}$)보다 높은 값이며 1991년 4월 대증식기에 발생한 정점의 표층수중 Chl-*a*의 농도(평균 $3.61 \mu\text{gL}^{-1}$)보다 높은 값을 보였다(과학기술처, 1991). 이러한 식물플랑크톤의 증식은 표층수의 영양염을 빠르게 소비하여 황해 중앙해역 정점들의 표층 영양염 고갈현상을 유발하였다(Fig. 6). 규산염은 측선 B의 황해 중앙해역에 위치한 B8의 표층에서 $7.00 \mu\text{M}$ 이상의 높은 농도를 나타냈지만 질산염과 인산염은 $1.00, 0.20 \mu\text{M}$ 이하의 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 2d, e, f, 6d, e, f). 반면 측선 D의 정점 D5에서 D8 사이에서는 질산염, 인산염, 그리고 규산염 모두 표층수에서 고갈되었음을 알 수 있었다(Fig. 3d, e, f, 6d, e, f). 이

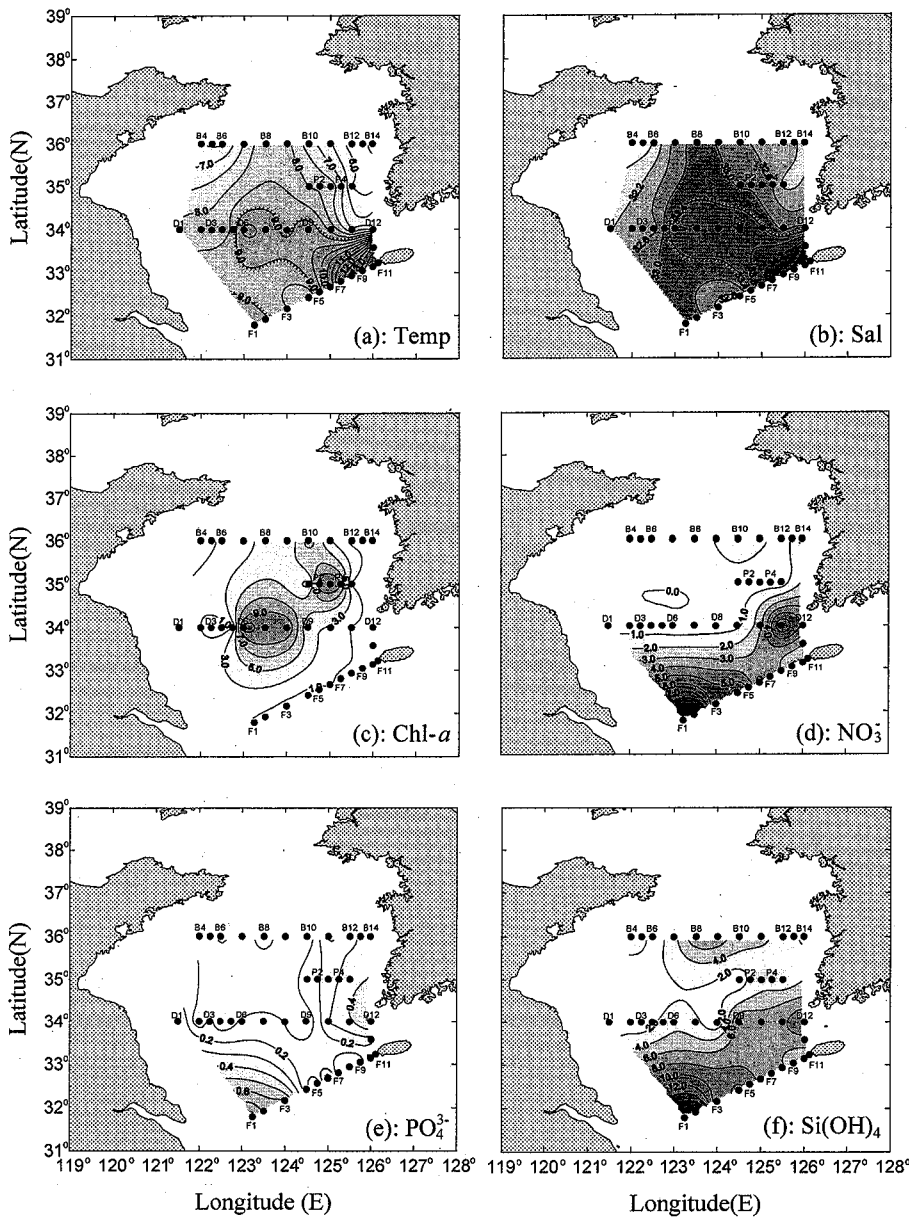


Fig. 6. Horizontal distributions of (a) temperature, °C, (b) salinity, psu, (c) chlorophyll-a, µg/L, (d) nitrate, µM, (e) phosphate, µM, and (f) silicate, µM in the surface waters.

러한 영양염들간의 분포차이는 분포하고 있는 식물플랑크톤 우점 종(예: 규조류, 와편모류 등)이 달라 야기된 것으로 사료된다(Choi, 1991; Noh, personal communication based on phytoplankton composition in April 1997).

조석전선의 영향: 연안수와 황해 중앙해역의 수괴가 만나는 정점 D6은 조석전선으로 사료되는 정점이다(Seung *et al.*, 1990; Choi, 1991). 조석전선으로의 영양염의 공급은 퇴적층으로 유입된 유기물이 조석의 영향으로 재부유(resuspension)되고 다시 박테리아에 의해 분해되면서 공급이 되는 것과 하천에서 유입된 영양염들이 조석에 의해 혼합되어 전선으로 공급되는 것으로 보고되었다(Floodgate *et al.*, 1981). 조석전선 해역에서는 일반적으로 영양염의 지속적인 공급과 외양역의 좋은 광조건이 식물플랑크톤의 빠른 증식을 유도해 매우 높은 생체량을 나타낸다(Pingree *et al.*, 1975; Choi *et al.*, 1995). 본 조사에서 정점 D6의 표층에서

12.00 µgL⁻¹ 이상의 매우 높은 Chl-a 농도를 보였으며(Fig. 3c, 6c) 이 정점에서 수층내 박테리아 생산력 또한 주위의 정점들보다 높게 나타났다(Hyun, in preparation). 이는 정점 D6이 조석전선에 위치하고 있음을 시사하며(Fig. 3a, b, 6a, b), Chl-a 분포와 박테리아의 분포는 표층해수에서 영양염의 고갈을 설명할 수 있는 좋은 증거가 된다(Simpson *et al.*, 1979; Floodgate *et al.*, 1981; Choi *et al.*, 1995). 결론적으로 조석전선의 형성은 연안과 외양의 해수의 유동과 영양염의 이동을 제한하고 있으며 영양염의 지역적인 분포에 영향을 주고 있었다. 정점 B11에서 B13까지는 Chl-a의 역전 현상이 일어나는 것(Fig. 2c)은 현재로는 명확하지 않으나 B14보다 연안쪽에 형성된 조석전선(Choi, 1991)의 영향으로 사료된다. 즉, 조석전선이 형성된 해역에서 해수의 유동으로 외양의 저층에 Chl-a의 농도가 높고 표층에서 낮은 역전현상이 발생할 수 있다고 보고된 바 있다(Mann and Lazier, 1991; Hong, 1997).

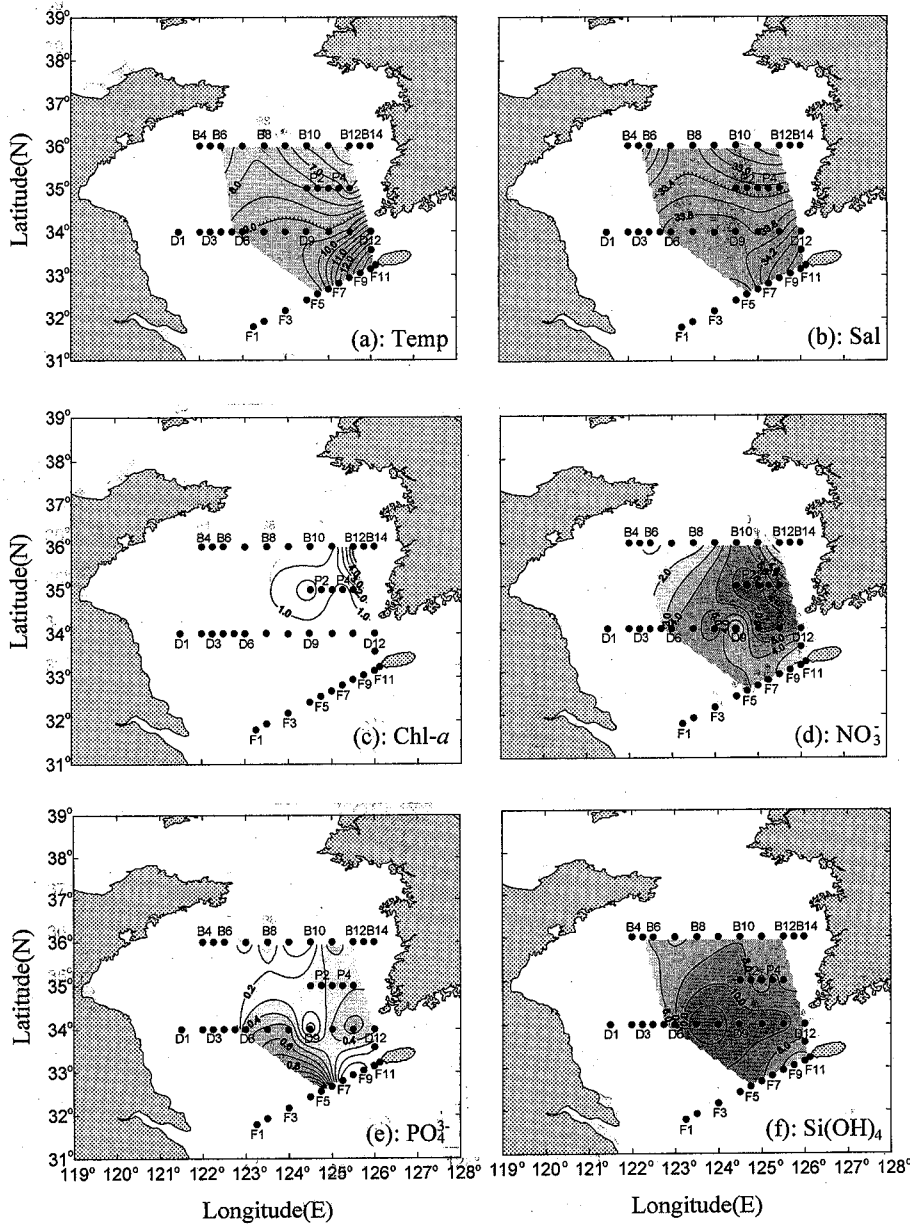


Fig. 7. Horizontal distributions of (a) temperature, °C, (b) salinity, psu, (c) chlorophyll-*a*, µg/L, (d) nitrate, µM, (e) phosphate, µM, and (f) silicate, µM at 50 m depth.

결론

춘계 황해내 영양염들의 분포특성은 수괴의 특성 및 이동, 조석 전선 그리고 식물플랑크톤의 분포에 영향을 받는 것으로 나타났다. 춘계 황해내 수괴들은 수직적인 혼합이 잘 이루어진 동계의 특성을 나타내 저층수로부터 표층수로의 영양염 공급이 원활히 일어난 것으로 나타났다. 표층으로의 원활한 영양염 공급과 호전된 광조건으로 야기된 식물플랑크톤의 대증식은 표층수에서 영양염을 고갈시켜 수직적인 농도구배를 형성하였다. 4월의 황해내 영양염의 분포특성은: (1) 광역적으로는 양자강희석수의 세력약화로 인해 황해내류수가 황해 중앙해역까지 유입되어 황해골에 위치한 정점들(D9, B8)의 저층에 나타나는 낮은 영양염 농도에 영향을 미치고 있었으며, 중국 및 한국연안의 높은 영양염 분포는 하천의

유입과 조석에 의한 수괴의 혼합으로 높은 영양염 농도를 함유한 연안수 분포와 연관되어 있었다. (2) 지역적으로는 정점 D6에 형성된 조석전선이 영양염의 이동을 제한하고 있어 영양염의 수평적인 분포에 영향을 주고 있으며, 전선역의 높은 식물플랑크톤 생체량은 표층수에서 영양염을 고갈시켜 수직적인 영양염 분포에 영향을 미치고 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 “황해의 해수순환과 물질플럭스 연구 (BSPN 97357-00-1103-1)”의 지원으로 수행되었습니다. 논문심사를 맡아 세심한 비판과 제언을 해주신 심사위원 군산대 양재삼 교수님과 광주대 양성렬 교수님께 감사드리며 시료 채취에 도움을

주신 은누리 선생님과 승조원 여러분들의 노고에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 과학기술부, 1998. 황해 해수순환과 물질플럭스 연구: 황해의 물질균형 및 생지화학적 순환 연구. 한국해양연구소, BSPN 97357-03-1100-4, 437pp.
- 과학기술처, 1991. 한반도 주변해역의 화학물질수지 및 순환연구 (서남해역), 제1차년도 년차보고서. 한국해양연구소, BSPG 00132-391-4, 143pp.
- 과학기술처, 1992. 한반도 주변해역의 화학물질수지 및 순환연구 (서남해역), 제2차년도 년차보고서. 한국해양연구소, BSPG 00149-489-4, 231pp.
- 과학기술처, 1995. 쿠로시오 해역과 동중국해의 해양순환 - 동중국해 동부지역 중심- (제1차년도). 한국해양연구소, BSPN 00275-812-1, 462pp.
- 해양수산부, 1998. 황해에서의 폐기물 투기가 수산환경에 미치는 영향에 관한 연구. 인하대학교 해양과학기술연구소, 339pp.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu and G.A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **4**: 57-76.
- Broecker, W.S., 1974. Chemical oceanography. Harcourt Brace Jovanovich, Inc., New York, 214 pp.
- Cha, H.J., J.Y. Kim, C.H. Koh and C.B. Lee, 1998. Temporal and spatial variation of nutrient elements in surface seawater off the west coast of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **3**: 25-33.
- Chester, R., 1990. Marine Geochemistry. Unwin Hyman, London, 698 pp.
- Choi, J.K., 1987. Influence of the Shallow sea front off Kyeonggi Bay on primary productivity and community structure of phytoplankton, KOSEF Rep., 70 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. Kor. Soc. Oceanogr.*, **26**: 223-241.
- Choi, J.K., J.H. Noh, K.S. Shin and K.H. Hong, 1995. The early autumn distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea, 1992. *The Yellow Sea*, **1**: 68-80.
- Floodgate, G.D., G.E. Fogg, D.A. Jones, K. Koçhte and C.M. Turley, 1981. Microbiological and zooplankton activity at a front in Liverpool Bay. *Nature*, **290**: 133-136.
- Gong, G.C., Y.L. L. Chen and K.K. Liu, 1996. Chemical hydrography and chlorophyll a distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrients dynamics. *Cont. Shelf Res.*, **16**: 1561-1590.
- Harris, G.P., 1986. Phytoplankton ecology : Structure, function and fluctuation. Capman and Hall, New York, 348 pp.
- Hong, G.H., S.H. Kim and C.S. Chung, 1997. Contamination in the Yellow Sea Proper : A review. *Ocean Research*, **19**: 55-62.
- Hong, G.H., 1988. A study on the geochemistry of the Han River system and Soyang Lake. KORDI report. BSPE00115-185-4, 180 pp.
- Howarth, R.W., 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol.*, **19**: 89-110.
- Hu, D.X., 1990. Chinese study on physical oceanography in the Southern Yellow Sea. *Yellow Sea Research*, **3**: 13-20.
- Huanxiniang, D. and S. Zhiliang, 1985. The vertical distribution of the chemical factors in the Yellow Sea Cold Water. *Studia Marina Sinica*, **25**: 41-51.
- Kim, K., H.K. Rho and S.H. Lee, 1991. Water masses and circulation around Cheju-Do in summer. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **26**: 262-277.
- Lee, K.W., 1990. Chemical characteristics of the Yellow Sea and needs for international cooperation. *Yellow Sea Research*, **3**: 21-26.
- Libes, S.M., 1992. An introduction to marine biogeochemistry. John Wiley and Sons, New York, 734 pp.
- Lie, H.J., 1984. A note on water masses and general circulation in the Yellow Sea (Hwanghae). *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **19**: 187-194.
- Lie, H.J., 1986. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae. *Prog. Oceanogr.*, **17**: 229-242.
- Lie, H.J. and C.H. Cho, 1997. Surface Current field in the eastern East China Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **32**: 1-7.
- Mackey, D.J., J. Parslow, H.W. Higgins, F.B. Griffiths and J.E. Sullivan, 1995. Plankton productivity and biomass in the western equatorial Pacific: Biological and physical controls. *Deep sea Research II*, **42**: 499-533.
- Mann, K.H. and J.R.N. Lazier, 1991. Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans. Blackwell Scientific Publications, Boston, 466 pp.
- Mingazzini, M., A. Rinaldi and G. Montanari, 1990. Multi-level nutrient enrichment bioassays on Northern Adriatic coastal waters. In: Marine coastal eutrophication, edited by Vollenweider, R.A., R. Marchetti and R. Viviani, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 115-131 pp.
- Millero, F.J. and M.L. Sohn, 1992. Chemical oceanography. CRC Press, London, 531 pp.
- Milliman, J.D. and R.H. Meade, 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Global.*, **91**: 1-21.
- Nakato, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and Yellow Sea. *J. Fac. Mar. Sci. Technol. Tokai Univ. Spec. No. November*, 199-367 pp.
- Nitani, H., 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Kuroshio, edited by Stommel, H. and K. Yoshida, University of Tokyo Press, Tokyo, 353-369 pp.
- Park, Y.C. and J.K. Choi, 1993. Oceanographical consideration on waste disposal in the marine environment. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **28**: 144-152.
- Park, Y.C., H.J. Lee, J.W. Son, and S.K. Son, 1998. Chemical environment of ocean dumping site in the Yellow Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **3**: 203-213.
- Park, Y.H., 1985. Some important summer oceanographic phenomena in the East China Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **20**: 12-21.
- Park, Y.H., 1986. Water characteristics and movements of the Yellow Sea Warm Current in summer. *Prog. Oceanogr.*, **17**: 243-254.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of Chemical and Biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.

- Perkins, E.J., 1974. The biology of estuaries and coastal waters. Academic Press, London, 677 pp.
- Pingree, R.D., P.M. Holliga and G.T. Mardell, 1978. The effects of vertical stability on phytoplankton distributions in summer on the northwest European Shelf. *Deep-Sea Research*, **25**: 1011–1028.
- Seung, Y.H., J.H. Chung and Y.C. Park, 1990. Oceanic studies related to the tidal front in the Mid-Yellow Sea off Korea: Physical aspects. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **25**: 84–95.
- Shen, Z.L., 1996. Nutrients distribution characteristics in seawater of the Yellow Sea. *The Yellow Sea*, **2**: 58–64.
- Simpson, J.H., D.J. Edelsten, N.C.G. Morris and P.B. Tett, 1979. The Islay front: Physical structure and phytoplankton distribution. *Estuarine and Coastal. Marine Science*, **9**: 713–726.
- Stowe, K.S., 1979. Ocean science. John Wiley & Sons, New York, 610 pp.
- Taylor, D., S. Nixon, S. Granger and B. Buckley, 1995. Nutrient limitation and the eutrophication of coastal lagoons. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, **127**: 235–244.
- Zhang, J., 1996. Nutrient elements in large Chinese estuaries. *Cont. Shelf Res.*, **8**: 1023–1045.
- Zhang, J. and M.G. Liu, 1994. Observations on nutrient elements and sulphate in atmospheric wet depositions over the northwest Pacific coastal oceans-Yellow Sea. *Mar. Chem.*, **47**: 173–189.

1998년 9월 23일 원고 접수
 2000년 4월 21일 수정본 채택
 담당편집위원: 박용철