

## 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성

이 동 섭

부산대학교 지구환경시스템학부

### Characteristics of Nutrients Distribution in Summer and Winter in the South Sea

TONGSUP LEE

Division of Earth Environmental System Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

여름과 겨울철 남해의 해수에 포함되어 있는 영양염의 분포 특성을 수온, 염분, 걸보기 산소 소모량, pH 등의 환경 인자들과의 상관도를 통해 파악하고자 하였다. 여름철에 영양염의 분포는 염분보다는 수온과 양호한 상관도를 보였으며 생물 활동과 관련이 깊은 pH, 걸보기 산소 소모량과 유의한 상관관계를 보였다. 이로 보아 여름철에 형성되는 염전선역에서 일차생산자에 의한 영양염 소비가 활발하여 염분과 영양염과의 상관성을 강력하게 변형시키는 것으로 판단된다. 겨울철에는 수온이 영양염과 가장 유의한 상관관계를 나타내어 수직 혼합된 냉수와 북상하는 난류의 세력이 만나는 열전선의 위치가 영양염 분포에 가장 중요한 요인으로 분석되었다. 여름철에 가장 우수한 상관도를 보였던( $R^2 > 0.6$ ) pH의 경우 겨울철에 생물 활동이 미약하여 상관도가 크게 낮아졌다( $R^2 < 0.5$ ). 수심에 대해 적절한 질산염+아질산염, 인산염, 규산염의 값은 각기 여름철에는  $321 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $23 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $637 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었고 겨울철에는  $261 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $31 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $742 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 계산되었다. 영양염의 질소 대 인의 비는 여름철에는 인이 상대적으로 부족한 반면 겨울철에는 이와 반대로 질소가 결핍되어 우기에 강우와 하천을 통한 질소의 유입이 남해 생태계 유지에 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

This paper presents the results of recent nutrients measurement and analysis in relation to other environmental parameters such as temperature, salinity, AOU and pH in the South Sea, Korea. In summer, temperature showed stronger correlation with nutrients than salinity and also did the parameters related to biological activities such as pH and AOU. Implications of above results exemplify that primary producers in the vicinity of salt front actively consumed nutrients so that nutrients-salinity correlation is strongly modified in the salt front. Nutrient in winter showed significant correlation only with temperature. Nutrient distribution seems governed by the location of thermal front between vertically mixed cold water in northern area and warm waters flowing north. Due to weak biological activity in winter pH-nutrients correlation, which was strongest in summer ( $R^2 > 0.6$ ) dropped sharply in winter ( $R^2 < 0.5$ ). Depth integrated nitrate+nitrite, phosphate and silicate values are  $321 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $23 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $637 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$  in summer and  $261 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $31 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $742 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$  in winter, respectively. N/P values in summer exhibit phosphorus deficiency, however, winter situation is reversed for nitrogen. Nitrogen input via precipitation and riverine discharge in wet season seems potentially critical for maintaining the South Sea ecosystem.

### 서 론

남해는 반폐쇄성 대륙 주변해인 황해와 동해가 북서 태평양과 연결되는 남쪽 길목에 위치하고 있어서 두 바다에 해수를 비롯한 물질과 에너지를 공급하는 중요한 교량의 역할을 담당한다. 남해의 동부에는 대양의 강한 서안 해류(쿠로시오)에서 분지된 대마 난류가 흘러 들고 있으며 서쪽에는 장강에서 많은 양의 강물이 흘러 든다. 이처럼 넓게 발달한 대륙붕 위에서 양극단에 비유될 수 있는 강물과 외양 해수가 혼합되는 예는 전세계적으로도 희소하여 흥미로운 연구 대상 해역이다. 인구가 가장 많은 국가

인 중국의 인구 밀집 지역을 지나 남해의 서부로 흘러 드는 장강은 전세계에서 하천 유출량이 세 번째로 많은 큰 강으로 자연적인 풍화 산물은 물론 농경, 목축, 그리고 공업화가 진행중인 도시로부터 유입되는 막대한 양의 인위적 부산물을 남해로 공급한다. 이러한 물질에 대한 최근의 학술적 관심은 해양 오염과 지구 온난화로 대표되는 지구 변화 측면에서 대륙붕이 대륙으로부터 공급된 물질의 지구 규모의 순환에서 담당하고 있는 기능의 두 가지로 집약된다. 후자의 궁극적인 관심사는 이산화탄소 순환이지만 질소와 인 등 친생물 원소를 이용하는 간접 연구도 권장되는 연구 주제로(Hall *et al.*, 1996) 영양염은 매우 중요하게 다루

어지는 인자이다.

남해 해수의 영양염에 대한 광역 조사는 80년대 말 한국해양 연구소(1993)에서 수행한 바 있고 국립수산진흥원에서는 비정기적인 관측을 수행하고 있으며 최근 남해 연안에서 빈발하는 적조 발생과 관련하여 영양염에 대한 관심이 높아지고 있다. 국내 학계의 경우 90년대에 들어 영양염에 대한 연구는 매우 부진한 편으로 영양염을 주제로 다룬 논문은 제주 해협의 해류에 의한 영양염의 수송을 다룬 Suk *et al.*(1996)과 여름철 남해 표층 저염수의 영양염 농도를 다룬 김 등(1998)이 있지만 환경인자와의 상관성을 분석한 예는 거의 없다. 인접국인 중국의 경우를 보면 Jiang and Wang(1990)은 영양염의 질소 대 인의 비가 동중국해 수계의 추적자로 쓰일 수 있다고 주장하였으며, Wong *et al.*(1991)은 동중국해의 대륙붕단에서 일어나는 쿠로시오 중층수의 용승이 동중국해로 영양염을 공급하는 매우 중요한 과정이라 지적하였다. Wang *et al.*(1992)은 영양염의 분포로서 수괴의 판별 뿐만 아니라 해수의 이동 방향을 밝힐 수 있다고 보고하였으며 대만의 Chen *et al.*(1995)은 대만 북부 해역에서 쿠로시오와 동중국해 사이의 해수 교환율을 산정하는데 영양염을 이용하는 등 주변국에서 영양염을 이용하는 연구는 우리나라 보다 활발하게 수행되고 있다. 과거의 자료 획득 노력은 남해가 계절과 연도에 따라 역동적으로 변화하는 환경임을 고려할 때 아주 미흡한 편이라 지적하지 않을 수 없으며 지금까지 영양염은 해양 환경의 주요 인자로 인식되어 연구 주제로 다루어졌기 보다는 기초생산과 관련된 보조 인자 정도로 인식되어 소홀하게 취급되어 왔다

고 보인다.

지금까지 확보된 자료로써는 장강을 통해 유입된 영양염이 오염(부영양화) 또는 적조 발생에 어떤 영향을 미치는가를 판단하기 어려우며 또한 중국 연안에서 유입된 막대한 양의 물질들이 최종적으로 어떻게 분배되는 것인가 하는 질문에 답하기에 부족하다. 육지로부터 해양으로 유입된 물질은 단순히 해수의 움직임에 따라 이동되고 확산되는 것이 아니라 영양염처럼 생물의 활동과 밀접하게 관련된 물질은 생화학적으로 변화되면서 퇴적물로 제거되고 일부는 산화과정을 거쳐 해수 층으로 되돌려지기 때문에 보존성이 약하고, 순환 경로가 복잡하여 농도만으로는 거동을 파악하기 어려우므로 해양의 여러 인자와 결부시켜 특성을 파악해야 할 필요가 있다. 이 연구는 해양과학공동연구소 주관으로 남해의 해양학적 특성을 파악하기 위해 수행한 1997년도 여름과 이듬해 겨울에 수행한 남해 조사로 획득한 영양염 자료를 다룬 것으로 해양연구소의 80년대 후반 조사 이후에 처음으로 실시한 광역 조사 자료를 제시하고자 한다. 이 논문은 영양염과 이에 관련된 인자들 간의 상호 관련성을 분석하여 남해 해수에 용존되어 있는 영양염의 분포 특성을 제시하고자 하였고 이로부터 남해에 대한 해양학 정보를 추출하고자 하였다.

**재료 및 방법**

수온, 염분 및 영양염을 비롯한 해양 자료는 탐양호를 사용하여 여름과 겨울 두 차례에 걸친 남해 조사에서 획득하였다(Fig.

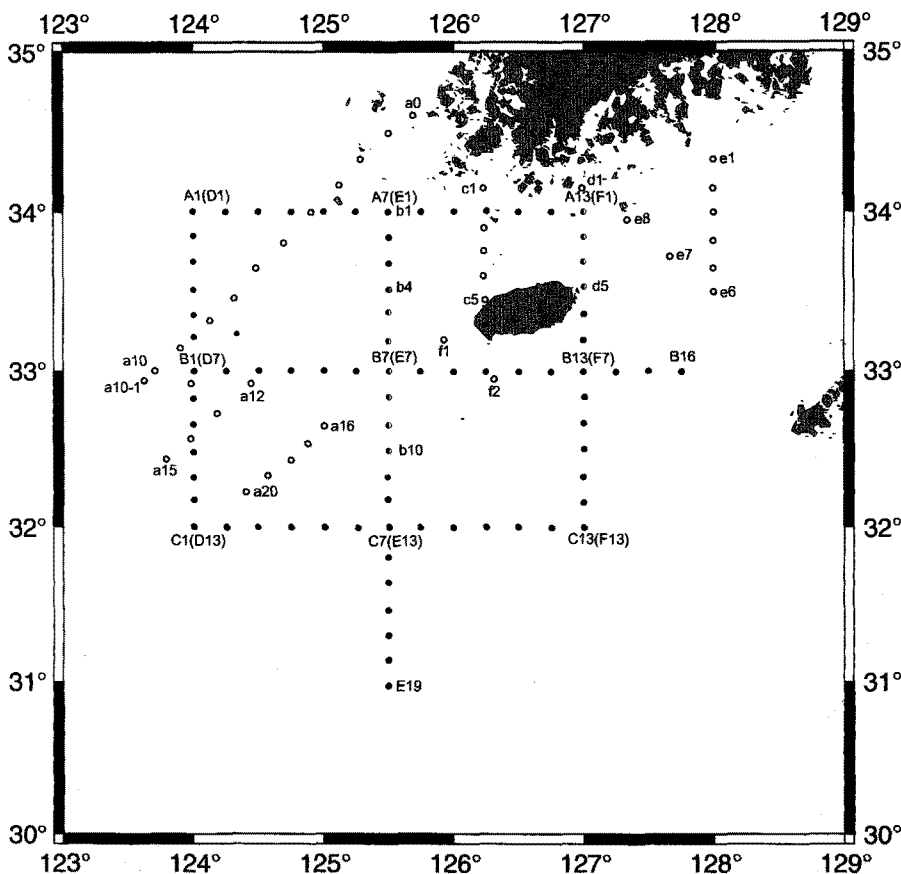


Fig. 1. A map showing sampling stations for Aug. 1997 (filled circles) and Feb. 1998 cruise (empty circles).

1). 여름철 조사는 1997년 8월 25일에서 9월 2일 기간에, 그리고 겨울철 조사는 1998년 2월 21일에서 26일 기간 동안 수행되었다. 각 정점에서 수온과 염분은 CTD(Seabird 9/11 plus)로 측정하였으며 사용한 자료는 군산대학교의 이상호 교수와 부경대학교의 이재철 교수 연구진에 의해 처리된 자료이다. 용존 산소는 CTD에 장착한 Clark형 측정기로 측정하였다. 걸보기 산소 소모량을 산출하기 위해 해수의 용존 산소 포화 농도는 Benson and Krause(1984)의 방법에 따라 계산하였다.

영양염은 현장에서 0.45  $\mu\text{m}$ 막 여과지로 거른 해수를 폴리스타일렌 병에 담아 냉동 운반하여 실험실에서 발색법으로 질산염( $\text{NO}_3^-$ ), 아질산염( $\text{NO}_2^-$ ), 인산염( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), 규산염( $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ )의 네 가지를 측정하였다. 인산염은 100 mm의 빛 투과거리를 지닌 셀을 지닌 가시광선-분광분석기(Shimadzu 160A)를 사용하였으며 나머지는 Alkema사의 영양염 자동 분석기를 사용하였다. 규산염을 제외하고는 JGOFS(1996)의 영양염 분석 지침에 따라 측정하였고 규산염은 Koroleff (1983)의 방법에 따랐다.

해수의 pH측정은 Clayton and Byrne(1993)이 제시한 m-cresol purple 지시 시약법을 이용하여 가시광선-분광분석기(HP8453)로 측정하였다. 빛 투과거리가 100 mm인 셀을 사용하였으며 항온 순환수조를 사용하여  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 로 조절한 뒤 선상에서 바로 측정하였다. 이 방법에 대한 자세한 절차와 기타 주의 사항들은 DOE(1994)를 따랐다. 해수의 산소 동위원소는 기초과학지원연구소에 의뢰하여 안정 동위원소 질량분석기(VG Prism II)로써 분석되었다. 해수로부터 산소 시료는  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  평형법(Eps-tein and Mayeda, 1953)으로 준비되었다. 분석 정밀도는 0.1‰이고 측정값은 표준 해수에 대한 상대값으로( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ) 나타내었다.

### 결 과

남해 해수의 영양염은 천해의 대륙붕 위에 기원이 다른 물이 흘러 들어 이동하며 혼합되는 과정에서 생물에 의해 소비되고 재생산되기 때문에 분포 특성은 해수의 지리적 위치는 물론 수심에 따라서도 큰 차이가 예상된다. 특히 중국 대륙 기원 담수의 영향이 강한 여름철에 남해의 수계는 더욱 복잡할 수 밖에 없다. 기원이 다른 해수는 서로 다른 농도의 영양염을 지니고 있을 것으로 예상되므로 영양염의 분포 특성을 파악함에 있어 기원 해수가 몇 종류나 되는가 하는 점은 관심의 대상이다. 수계의 파악에는 전통적으로 수온-염분 분포가 널리 이용되어 왔다(Svedrup *et al.*, 1942; Worthington *et al.*, 1981). 중국측 문헌을 검색한 결과를 보면 수계의 보다 객관적인 구분을 위해 수온과 염분 자료를 회귀 분석한 예가 있고(Su, 1980), 요인 분석과 군집 분석을 병행하기도 하였으며(Liu *et al.* 1984), 퍼지 응용(Wang *et al.* 1986), 판별 분석(Liu and Su, 1987), 다변량 분석(Qi *et al.* 1991), 주성분 분석(Chen and Yao, 1994) 등 다양한 통계 방법이 적용된 예가 있다. 우리나라에서는 Kim *et al.* (1991)이 군집 분석을 한차례 적용하였을 뿐 통계량을 자주 이용하고 있지 않는데 확률에 의한 추론 보다는 물리 이론에 의한 해석을 중시하기 때문으로 여겨진다. 이 연구에서는 남해의 기원 해수가 수온과 염분 특성에서 아주 크게 차이가 난다는 판단에 근거하여 전통적으로 사용되어 온 수온-염분 분포도를 이용한 단

순한 방법을 사용하였다.

### 1997년 여름철 남해 영양염의 분포 특성

여름철(1997년 8월) 각 정점의 수심 1 m 간격으로 처리된 수온과 염분 자료는 Fig. 2의 수온-염분 분포도에 나타나있다. 수온-염분 자료는 네 개의 꼭지점으로 이루어진 사각 평면 안에 갇힌 모습을 하고 있으며 각 꼭지점은 왼쪽 위로부터 시계 방향으로 장강 희석수, 대마 난류 표층수, 대마 난류 저층수, 황해 냉수에 해당한다. 따라서 이 시기의 수계는 표층에서는 장강 희석수와 대마 난류 표층수간의 세력 경쟁으로 수온 약층 이하에서는 황해 냉수와 대마 난류 저층수간의 밀도 차이에 의한 세력 다툼에 의해 특징이 결정되는 것으로 단순화된다. 수온-염분 분포도는 각 기원 해수의 수온과 염분 특성이 아주 뚜렷하여 쉽게 판별될 수 있음을 보여주고 있다. 이 시기에 담수의 영향력은 매우 강력하여 염분이 34 psu를 넘는 전형적인 대마 난류 표층수는 관측되지 않았다. 가장 염분이 높은 표층수( $S > 33.7$  psu)의 산소동위원소 측정값도  $-0.1\text{‰}$ 로서 쿠로시오 해수의 값  $0.2\text{‰}$ 보다 낮아 담수와 혼합되어 있음을 알 수 있었다. 그리고 표층의 염진선은 장강 하구쪽과 동쪽의 대마 난류 경계역에서 강하게 발달하고 있었다.

수온-염분 분포도에는 밀도( $\sigma_t$ )가 25.5정도인 무거운 저층 해

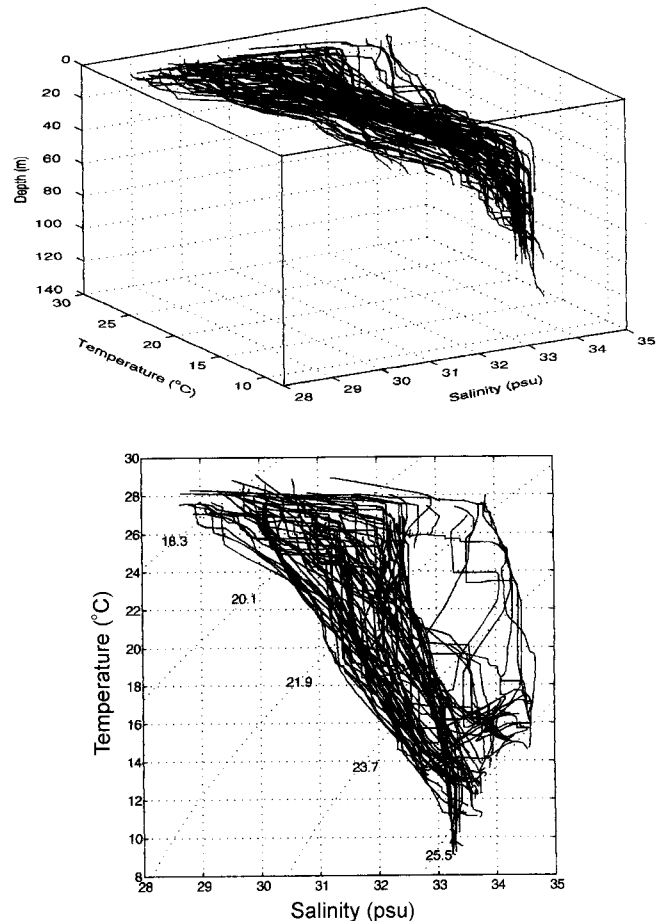


Fig. 2. Temperature-salinity diagrams of Aug. 1997 South Sea cruise: upper panel, 3-D T-S diagram; lower, 2-D diagram.

수가 나타나는데 수온이 낮기 때문에 (< 10°C) 무거운 해수는 조 이 해수 세력의 남쪽경계는 정점 D06-B2-E10-B10-A8을 잇는 사해역 북부의 황해쪽에(정점 A4-A6) 세력의 근거를 두고 있고 해역으로 이하에서는 황해 냉수역으로 지칭하였다. 반면 염분이

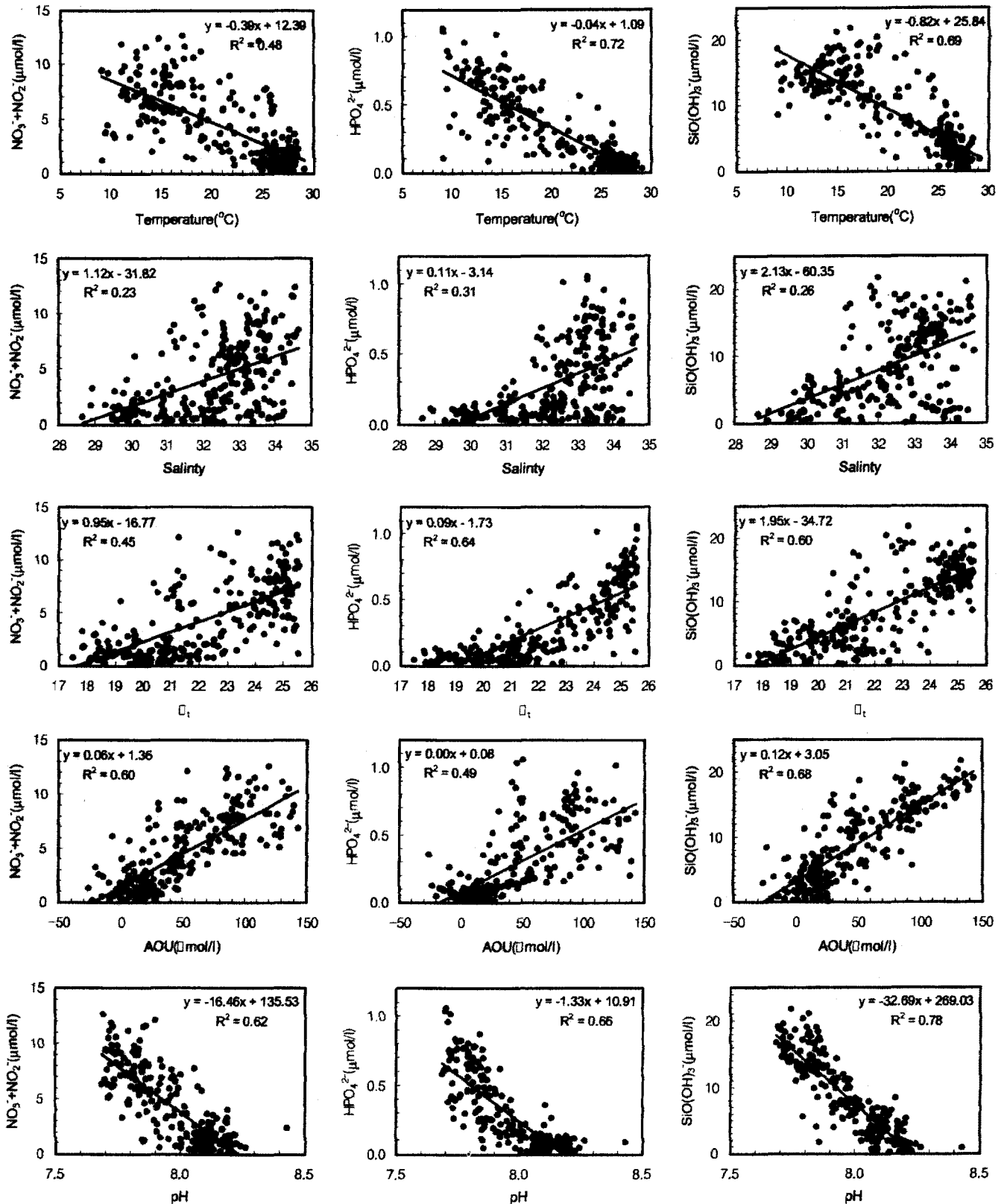


Fig. 3. Plot of nutrients against environmental parameters (temperature, salinity, sigma-t, AOU and pH) measured in Aug. 1997 in the South Sea. Results of a simple linear regression are shown together in each figure.

높아 무거운 해수(> 34.5 psu)의 거점은 정점 F10-F12, B16에서 발견되었는데 이 세력의 경계는 A9-F4-B11-C9을 잇는 해역으로서 대마 난류역으로 구분되었으며 황해 냉수역과 대마 난류역의 경계면에서 두 무거운 해수 사이의 혼합이 발견된다. 냉수는 북쪽으로부터 양자강 천퇴(수심이 50 m 이내인 정점 D6-12, C1-4)와 제주도 사이의 수심이 비교적 깊은 곳을 따라 남하하는 형태를 보인 반면 고염인 해수는 북쪽으로 세력을 확장하며 제주도 동쪽에서 분지하여 하나는 제주도 남쪽에서 서진하고 하나는 제주 해협의 골을 따라 서진하는 형태를 보여 주었다. 한편 저층수의 이동은 지형에 큰 영향을 받는 것으로 드러났는데 양자강 천퇴역에서는 저층수로 지목할 만한 특징이 뚜렷한 해수가 존재하지 않았다.

남해의 저층에서 가장 빈번하게 관측되는 해수는 밀도가 24.50에서 25.50 사이인 해수로 수온은 15.5°C에서 17°C, 그리고 염분은 33.5 psu에서 34.3 psu의 범위를 보였다. 이 저층 해수는 수온-염분 분포도에서(Fig. 2) 수온 15.5 염분 33.9에서 동서 방향의 선으로 나타나며 황해 냉수와 대마 난류 저층수의 직접 혼합이 아니라 이들의 중층수간 혼합으로 만들어짐을 시사하고 있다.

여름철 수온 및 염분과 영양염의 상관관계를 비교하면 염분이 수온에 비해 매우 낮게 나타난다(Fig. 3). 이것은 표층 해수간의 염분에서는 차이가 나지만 식물의 광합성에 영양염이 쓰인 결과로 영양염이 모두 낮은 농도를 보이기 때문이었다. 표층에서 해수의 혼합이 염분에 잘 반영된다고 가정할 때 영양염은 상대적으로 보존성이 미약함을 나타낸다. 한편 밀도는 수심과 관련이 깊은 인자로서 저층에서 유기물의 재생과 퇴적물 표층으로부터의 확산에 의한 공급에 의해 높은 농도를 보이는 특성을 잘 반영하고 있다. 인산염과 규산염은 밀도에 대해 유의한( $R^2 > 0.6$ ) 상관관계를 보였다. 인산염과 규산염이 염분과 밀도에 대해 질소계 영양염보다 양호한 상관관계를 보이는 이유는 해양으로의 유입과 순환 경로가 질소계 영양염에 비해 단순하기 때문으로 여겨진다. 대륙 주변해에서 질소계 영양염은 대기를 통해 많은 양이 유입되며 탈질소화정을 거치므로 다른 두 영양염에 비해 순환 경로가 복잡하다. 또한 질소계 영양염은 해양에서 다양한 화학종으로 분포하는데 분자량이 작은 유기질소계 화합물과 암모늄 이온( $\text{NH}_4^+$ )을 측정하지 않았기 때문에 상관 관계가 좋지 못하게 나타날 수도 있다고 판단된다.

겉보기 산소 소모량(AOU)과 질소계 영양염은 상호 관련이 있는 것으로 나타났다(Fig. 3). 황해 냉수가 약 6개월 정도 표층과 격리되어 있는 동안 평균 60  $\mu\text{M}$ 의 산소를 소비한 것으로 보아 겉보기 산소 소모량이 100  $\mu\text{M}$ 을 초과하는 해수는 대략 1년 정도 표층과 격리되어 있었을 것으로 추정된다. 측정된 겉보기 산소 소모량이 200  $\mu\text{M}$  이하이기 때문에 남해 해수의 체류 시간은 2년 이내로 추정된다. 인산염의 경우 겉보기 산소 소모량이 많은 저층에서 질소계 영양염보다 큰 분산을 보이는데 이는 인산염이 타 영양염과는 달리 입자에 대한 흡착성이 크기 때문에 중저층 해수의 탁도와도 관련되어 있을 것으로 추측된다. 예상과는 달리 인산염보다 느리게 재순환되는 것으로 알려진 규산염이 오히려 겉보기 산소 소모량에 대해 가장 높은 상관 관계를 나타내었는데 이는 규산염이 입자와의 반응성이 인에 비해 낮은데 기인하는 것으로 판단된다.

영양염은 산의 짝염기로 수소 이온을 수용할 수 있으므로 자유 수소이온 농도(pH)와 음의 상관 관계가 예상되며 측정 결과는 영양염과 가장 양호한 상관 관계를 보였다(Fig. 3). 광합성에 의한 영양염의 소비로 인해 pH는 표층에서 높은 값을 보이며 저층에서 유기물 분해와 탄산염 광물의 용해에 의해 수심에 따라 감소하여 대마 난류역을 제외한 전 해역의 저층 pH는 7.7을 나타냈다. 수온이 높은 대마 난류역은 전 수심에서 pH 7.8 이상의 값을 보이며 영양염은 모두 pH와 매우 양호한 상관 관계( $R^2 > 0.9$ )를 나타냈다. 규산염은 겉보기 산소 소모량과 pH에 대해 탁월한 상관 관계를 보여 광합성과 저층에서의 유기물 분해가 농도 분포를 결정하는 주요인으로 판단된다. pH 값이 8.4를 넘는 해수는 중국측 정점 D13에서 발견되었는데 이곳은 장강 유출수의 세력이 강한 곳으로 장강수가 염기성을 띄거나 장강이 공급한 영양염에 의해 광합성이 매우 활발함을 지시하는 것으로 후자의 가능성이 높게 예상된다.

영양염의 질소 대 인의 비는 이미 동중국해 수계 연구에 중요하게 쓰여 온 인자이다. Bo *et al.*(1993)은 이 값은 연안에서 외해역으로 갈수록, 그리고 수심에 따라 증가하는 경향을 보이며 장강 희석수가 높은 값을 보인다고 보고하였다. Imai *et al.*(1994)은 황해 냉수가 Redfield 비보다 높은 값을 지니며 대마 난류는 Redfield 비인 16과 근사하다고 하였다. Wang *et al.*(1992)은 동중국해에서 영양염의 분포를 조사해보면 확인한 진신이 존재하며 이를 분석하면 수괴의 분류는 물론 해수의 흐름 방향을 파악할 수 있다고 보고한 바 있다. 전체 자료는  $R^2=0.45$ 의 느슨한 상관 관계를 나타내었지만(Fig. 4) 소해역별 자료를 보면 질소대 인의 비가 다른 해수들이 존재한다. 대마 난류역 영양염의 질소대 인의 비는 16.8로서 Redfield 비와 일치하여 이 해역의 해수가 대양 기원임을 시사하였다. 황해 냉수역에서는 Red-

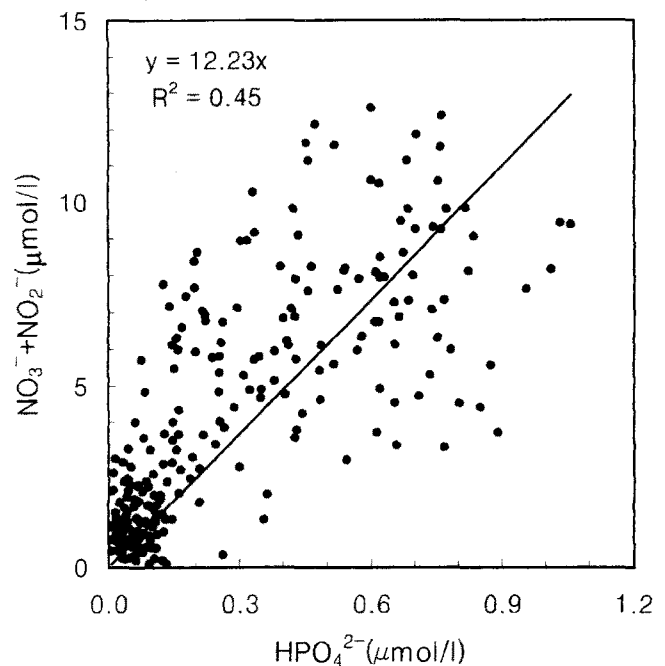


Fig. 4. N/P ratio of nutrients measured in Aug. 1997. Results of a simple linear regression is shown together.

field 비보다 낮은 값(14.6)이 관측되어 상대적으로 인은 풍부한 반면 질소계 영양염이 타 해역보다 농도가 낮았고 반대로 장강 회석수역에서는 Redfield 비보다 높은 값(26.3)을 보여 이 곳은 강물을 통한 질소계 영양염 공급이 인에 비해 상대적으로 우세한 것으로 나타났다.

**1998년 겨울철 남해 영양염의 분포 특성**

겨울철(1998년 2월) 각 정점의 수심 1 m 간격으로 처리된 수온과 염분 자료는 수온-염분 분포도에 나타내었다(Fig. 5). 수온-염분 자료는 여름과 마찬가지로 네 개의 꼭지점으로 이루어진 사다리꼴 평면 안에 갇힌 모습을 보이며 각 꼭지점은 오른쪽 위로 부터 시계 방향으로 대마 난류수, 남해연안수, 황해 냉수, 장강 회석수 또는 중국 연안수로 대표된다.

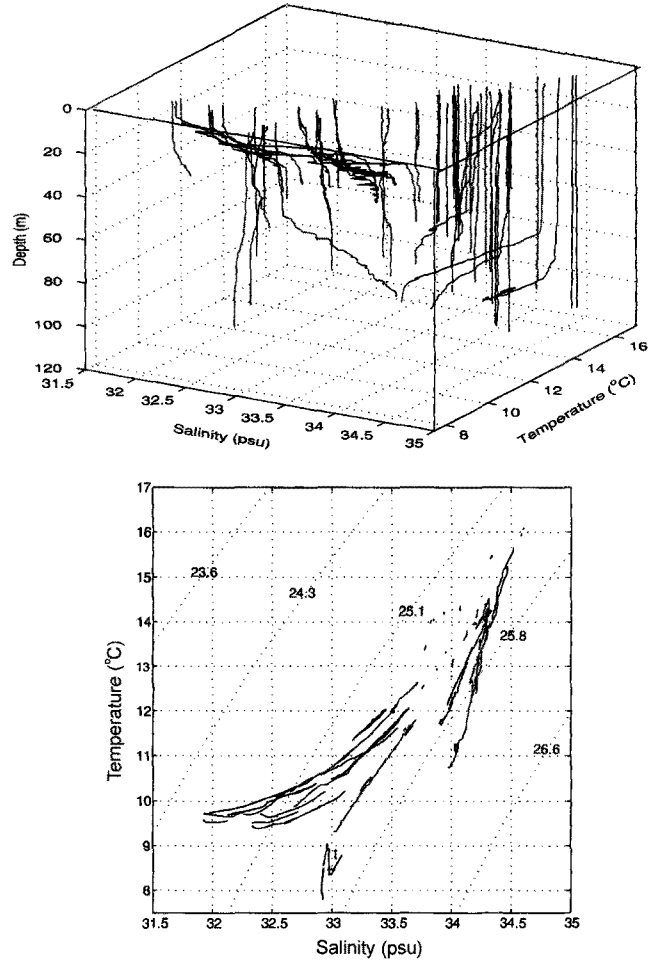
겨울철 남해 수계의 가장 뚜렷한 특징은 위성 사진으로부터 존재가 확인된 제주도 남서쪽에서 황해 내부로 진입하는 혀 모양의 온난하고 고염한 해수 덩이의 존재이다. 대마 난류에 뿌리를 둔 것으로 예상되는 고온 고염한 해수는 Y자 모양으로 왼쪽 가지는 황해 중앙부로 발달하여 황해의 해수를 우리나라 연안 해역과 중국 연안 해역으로 갈라 놓으며 남해 중앙부로 북상한 오른쪽 가지는 제주도 부근 해역을 포위하는 형상을 하고 있다. 이

시기 해수의 수온-염분 분포도를 보면 온난한 해수와 차가운 물은 수직으로 혼합이 잘 되어 있어서 정점의 자료가 점으로 나타나며 이 두 성질이 다른 해수 덩이가 접촉하는 곳에서 성층이 이루어져 자료가 선으로 표시된다. 황해 남동해역의 해수는 수직 혼합이 잘 되어 수온-염분 분포도에서 점 또는 짧은 선으로 나타나고 있으며 수온보다는 염분이 더 균일하고 9°C 이하의 냉수 특성을 보였다. 양자강 천퇴역의 표층 해수는 저온, 저염성이고 저층은 고온, 고염성인 수온-염분 역전 구조를 지니고 있어 수온-염분 분포도에서 수심에 따라 왼쪽 아래에서 오른쪽 위로 향하는 선으로 나타난다. 표층의 염분은 황해 남동부보다(정점 a0-a4) 낮았다. 저층의 고염, 고온 해수의 공급원은 북상하는 대만 난류로 중국 학자들에 의해 보고되고 있다. 이 시기에 대마 난류수는 수온은 낮아졌지만 여전히 가장 고온, 고염한 특성을 보이고 있으며 수직 혼합이 잘되어 있었고, 남해 서부 해역의 해수는 역시 수직 혼합은 잘되어 있으나 황해 냉수에 비해 수온과 염분이 높은 특성을 보였다.

양자강 천퇴역(정점 a10-a20)의 표층 해수(T ~9.5°C, S ~31.9 psu)는 맑은 편 황해 남동부 해수(T~ 9.5°C, S~ 31.9 psu)보다 저염한 특성을 보여 표층은 대륙으로부터 유입되는 담수에 의해 영향을 받고 있음을 보여 주었다. 허모양 관입 해수의 수온-염분 최대값(T=14°C, S=33.8 psu)은 그 기원으로 여겨지는 대마 난류수(T=16°C, S=34.6 psu)에 비해 낮으므로 해류의 형태로 또는 단속적으로 유입되며 황해 냉수와 활발하게 혼합되는 것으로 보인다. 따라서 관입 해수는 기원이 다른 두 종류의 해수가 혼합하여 만들어지는 것으로 판단된다. 조사 해역의 동부 경계에서(정점 d3-d5; e 정점들) 대마 난류의 영향이 강하게 나타났으며 정선 c, d, e 상의 남해 연안 정점들은 양자강 천퇴역이나 황해 남동부 해수에 비해 수온과 염분이 높은( $\Delta T=4^{\circ}C$ ,  $\Delta S=1$  psu) 특성을 보였다. 그리고 남해 연안역 해수는 혀 모양 관입 해수보다는 고염인 반면 수온은 낮아 대마 난류의 영향권에 있으나 냉각되고 있던 중의 해수로 판단된다. 황해 남동해역의 해수와 남해의 연안역 해수는 확연히 수온과 염분이 달라 황해의 냉수가 해류의 형태로 남해로 이동한다는 증거를 찾을 수 없었다.

이 시기에 양자강 천퇴역에는 여전히 성층이 유지되고 있으며 저층의 해수가 낮은 용존 산소 값을 지니므로 여름철에 용존 산소가  $2\text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$  이하로 나타났던 중저층 해수의 기원과 밀접하게 관련되어 있을 것으로 판단된다. 따라서 낮은 용존 산소를 지닌 해수를 추적함으로써 장강 회석수역 저층 해수의 거동을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 기존의 연구가 여름철에 대만 난류의 세력이 강해지면 북진 또는 북동진한다고 밝히고 있어 여름철에 제주도 서부와 남서부에서 관측되었던 중저층 저산소 해수 덩이의 기원이 될 소지가 높다.

겨울철 남해의 해수의 환경 인자와 영양염간의 상관도는 수온을 제외하고는 여름철에 비해 훨씬 약하게 나타났다(Fig. 6). 수온과 영양염은 여름과 마찬가지로 음의 상관관계를 나타내지만 여름의 경우 저온은 저층을 지시하는데 반해 겨울철의 경우는 상하층의 온도차가 적어 냉수를 가리키므로 의미는 다르다. 겨울철 북쪽의 냉수역은 수직 혼합에 의해 저층의 영양염이 상부로 공급되어 농도가 높아진 따뜻한 물은 저층으로부터의 공급이 상대적으로 미약하여 낮은 농도를 보인다. 겨울철에는 북쪽의 수직



**Fig. 5.** Temperature-salinity diagrams of Feb. 1998. South Sea cruise: upper panel, 3-D T-S diagram; lower, 2-D diagram.

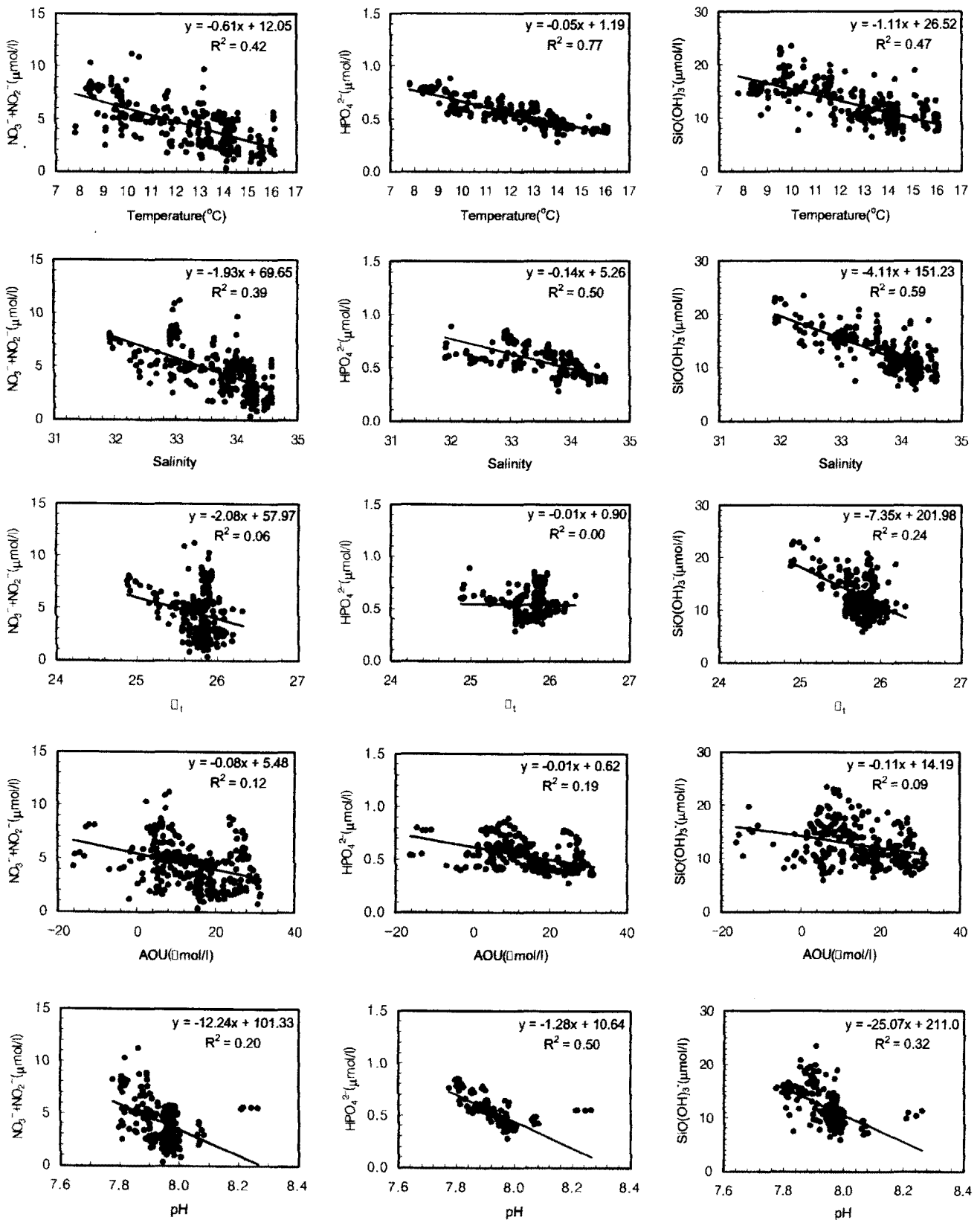


Fig. 6. Plot of nutrients against environmental parameters (temperature, salinity, sigma-t, AOU and pH) measured in Feb. 1998 in the South Sea. Results of a simple linear regression are shown together in each figure.

혼합이 잘 이루어진 냉수와 남쪽에서 북쪽으로 세력을 확산하는 난류 사이에 열전선이 발달하는데 수온과 영양염의 관계는 이 전

선이 어디에 위치하는가에 따라 인근 해역의 영양염 농도가 결정됨을 시사하고 있다. 인산염은 수온에 대해 더 양호한 상관도

를 보이는 반면 규산염은 염분에 대해 더 높은 상관도를 보여 좋은 대조를 이룬다. 이것은 인산염은 주로 저층의 유기물 분해로 공급되는데 반해 규산염은 육지의 공급이 상대적으로 더 중요하기 때문인 것으로 판단된다.

영양염과 염분의 상관관계는 여름철에 비해서는 양호하였는데 여름에는 양의 상관관계를 보인데 반해 겨울에는 음의 상관관계를 나타냈다. 염분이 낮은 물이 영양염을 많이 함유하는 것은 육지에서 영양염이 공급되고 있음을 지시하는 것으로 여름의 경우에는 기초생산자가 즉시 소비하였지만 겨울철에 생물활동이 위축된 결과로 상관관계가 공급에 의해 주도되었기 때문으로 해석된다. 겨울철에 수온보다 보존성이 높을 것으로 보이는 염분이 영양염에 대해 낮은 상관도를 나타내는 것은 겨울철 수계가 수온에 의해 지배되는 것을 의미하는 것으로 보이며 열 전선의 기능에 대한 자세한 연구가 필요하다고 보인다. 혀 모양의 온난 수괴의 규산염 농도는 주변 해수보다 확연하게 낮아 혀 모양 관입수는 대마 난류에 기원을 둔 외양 기원의 특성을 보존하고 있었다.

영양염과 해수의 밀도간에는 아예 상관 관계가 나타나지 않았다(Fig. 6). 이는 영양염이 수온과 염분에 대해 음의 상관관계를 보이는데 반해 실제 수심에 따른 수온-염분 구조는 표층은 저온 저염하고 저층은 고온고염한 역전 구조가 자주 발견되어 서로 상쇄시키는 방향으로 기여했기 때문이다.

겨울철 강한 바람과 냉각에 의한 수직 혼합에 의해 해수와 대기간의 기체 교환이 활발하기 때문에 겉보기 산소 소모량은 35  $\mu\text{M}$  이하로 낮았으며 영양염과 Redfield 비로 정의된 상관 관계가 전혀 나타나지 않았다(Fig. 7). 예상과는 달리 성층이 되어 있던 양자강 천퇴역과 남해안 정점의 산소 소모량이 전층 혼합이 이루어진 황해 남부 정점과 대마 난류역 정점보다 낮게 나타났다. 연안 정점의 저층 해수가 낮은 겉보기 산소 소모량을 갖

는 이유로 등밀도의 해수가 연안쪽에서 표층으로 노출되어 등밀도선에 따라 산소 공급이 이루어지고 있거나 아니면 기체의 용해도가 온도에 대해 비선형 관계를 가지므로 열확산을 받아 수온이 상승한 해수가 낮은 겉보기 산소 소모량을 지닌 것처럼 보이기 때문으로 해석된다. 어느 경우이던 겉보기 산소 소모량과 영양염의 관계는 생지화학적 물질 균형식의 예상에서 벗어나게 된다. 밀도로 보아 거의 수직 혼합된 해수에서 수심에 따라 겉보기 산소 소모량과 영양염의 농도가 차이를 보이는 것은 밀도의 균질화에 열염 확산이 크게 기여한 것으로 보여 표층 해수가 곧바로 심층으로 하강하지 않았다고 해석된다. 따라서 용존 기체의 확산이 열염 확산 보다 느리기 때문에 겉보기 산소 소모량이 높은 것처럼 나타나게 된 결과로 해석된다. 겨울철 남해의 해수가 모두 35  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  이하의 낮은 겉보기 산소 소모량을 보이는 것으로 보아 남해에서는 수온염분 역전층을 이루는 양자강 천퇴역의 저층수를 제외하고는 체류시간이 2년이 넘는 오래된 고유수가 존재하기 어려워 보인다.

pH는 여름철에 영양염과 가장 높은 상관관계를 보였으나 겨울철에는 인산염을 제외하고는 상관관계가 미약하게 나타났다. 이로써 pH는 생물의 활동과 매우 관련이 깊다는 것을 확인할 수 있었는데 제주도 북쪽의 한반도 연안 정점 C2에서만 유독 8.2 이상의 높은 값이 관측되어 직선회귀식과 별도의 거동을 보였다. 이 정점은 연안에 위치하고 있지만 고염의 특성을 보여(> 34 psu) 난류의 영향을 받은 곳으로서 겨울철 남해 염전선 경계에 위치 하였던 것으로 보인다. 여름철 정점 D13에서와 마찬가지로 높은 pH 값은 전선역에서의 생물 생산과 관련된 것으로 지목되는데 비슷한 특성을 보이는 정점이 나타나지 않아 확인할 수 없었다.

영양염의 질소대 인 값의 분산은 여름철에 비해 별 차이를 보이지는 않았지만 기울기는 큰 폭으로 줄어들었다(Fig. 7). 이는 수층에서 영양염의 농도가 소비와 재생산보다는 해수의 혼합과 확산에 지배 받고 있는 것을 반영하는 것으로 여겨진다. 황해와 대마 난류를 비교하면 상대적으로 대마 난류수에 인이 적은 양 포함되어 있으며, 남해 연안역은 황해보다는 대마 난류에 가까운 값을 보여 난류의 영향을 받고 있음을 나타내었다.

**영양염의 총량**

여름과 겨울철 각 조사 정점에서 측정된 자료를 수심별로 정리한 자료와 수심에 대해 적분한 자료를 Table 1에 정리하였다. 여름철에는 상층에서 식물 플랑크톤의 광합성의 결과로 영양염의 농도는 표층에서 저층 방향으로 증가하였으며 겨울철에는 수직 혼합의 결과로 상부 30 m까지의 농도가 일정하게 유지되는 특성을 보였다. 상층에서 영양염의 질소 대 인의 비는 Redfield 비 16보다 큰 값으로 나타나 여름철에 광합성은 인에 의해 제한되는 특성을 보여 일반적으로 해양에서 광합성이 질소에 의해 제한되는 것과는 반대되는 양상을 나타냈다. 장강 유출수가 상대적으로 많은 양의 질소를 공급하는 것도 하나의 요인으로 작용하는 것으로 보인다.

수심에 대해 적분한 값은 원자료를 최소 자승법으로 모사한 곡선으로부터 구한 것으로 여름철의 질산염+아질산염, 인산염 그리고 규산염의 평균값은 각각 321  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ , 23  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ , 637  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었고 겨울철에는 261  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ , 31  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,

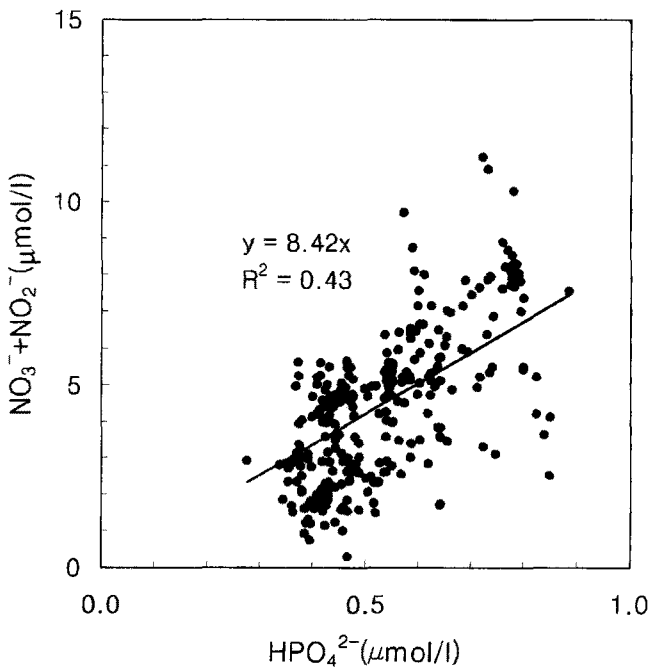


Fig. 7. N/P ratio of nutrients measured in Feb. 1998. Results of a simple linear regression is shown together.



742 mmol · m<sup>-2</sup>로 계산되었다. 조사 해역이 조금 다르기 때문에 무리한 해석이지만 인산염과 규산염의 총량은 증가한 반면 질산염의 총량은 줄어 들었다. 이는 장강을 통한 유입량이 차지하는 비중이 크다는 점을 반영하거나 저층에서 재생된 질산염의 상당 부분이 탈질소화 과정을 거쳐 소모됨을 의미하는 것으로 해석된다. 질소:인:규소의 비는 여름철에 14.8:1:27.7이었고 겨울철에는 8.3:1:23.9로 인이 상대적으로 빠르게 재생되는 특성이 반영되었다. 여름철의 질소 대 인의 비는 Redfield 비와 매우 유사하게 나타났는데 이는 상층에서는 영양염이 고갈된 상태에서 저층에서 재생된 영양염이 계산 값을 주도하기 때문이다. 반면 겨울철에는 유입된 영양염이 생물에 의해 쓰이지 못해 여름과는 사뭇 다른 값을 나타내는 것으로 보인다. 이 값을 토대로 유추하면 봄철 식물의 광합성은 질소에 의해 제한을 받게 될 것이며 여름철에는 인에 의한 제약을 받는 것으로 나타났기 때문에 강수와 장강을 위시한 하천으로부터의 질소의 유입은 남해의 생태계를 유지시키는데 결정적인 역할을 하는 것으로 유추할 수 있다.

## 토 의

영양염은 걸보기 산소 소모량과 짝을 이루어 대양 규모의 열염순환의 추적자로서는 매우 유용하게 사용되어 왔지만(Broecker and Peng, 1984) 대륙붕 위의 천해에서는 공급과 제거 요인이 다양하고, 순환이 빠르게 일어나기 때문에 수계의 추적자로서의 활용 가능성은 미리 검토되어야 한다. 남해의 경우 대마 난류의 기원으로 지목되는 쿠로시오 해수의 화학적 특성이 연중 큰 변화를 보이지 않으며 장강의 방출량은 연간 9.24×10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>에 이르는 막대한 양이고 약 72%가 5월부터 10월까지의 우기에 집중되어(Tian *et al.* 1993) 이 시기에 해수의 이동과 혼합에 대한 한시적인 추적자로서 활용이 가능해 보이며 김 등(1998)의 표층수 영양염 분포에 대한 연구 결과는 매우 긍정적이다. Tian *et al.* (1993)의 연구 결과와 여기에 인용된 과거의 자료에 따르면 장강 유출수는 질산염 농도가 유난히 높은 것이 특징으로 70~110 μM 범위의 값을 가지며 인산염과 규산염의 평균 농도는 각각 0.8 μM, 110 μM이다. 장강수의 영양염의 농도는 염전선 안쪽에서 염분 25 psu로 해수와 혼합될 때까지 선형으로 감소하여 단순히 희석됨을 보여준다. 이들의 자료를 직선 회귀분석하면 장강 유출수의 질산염, 인산염 그리고 규산염의 농도는 각각 87 μM (R<sup>2</sup>=0.85), 0.8 μM(R<sup>2</sup>=0.86), 117 μM(R<sup>2</sup>=0.98)로서 계산되고 인산염을 제외하고는 해수의 농도에 비해 한자리 이상 높은 값을 지니므로 추적자로서의 가능성이 높게 기대되었다. 특히 규산염은 아주 높은 표본결정계수를 보여 다른 영양염에 비해 보존성이 높은 것으로 드러났다.

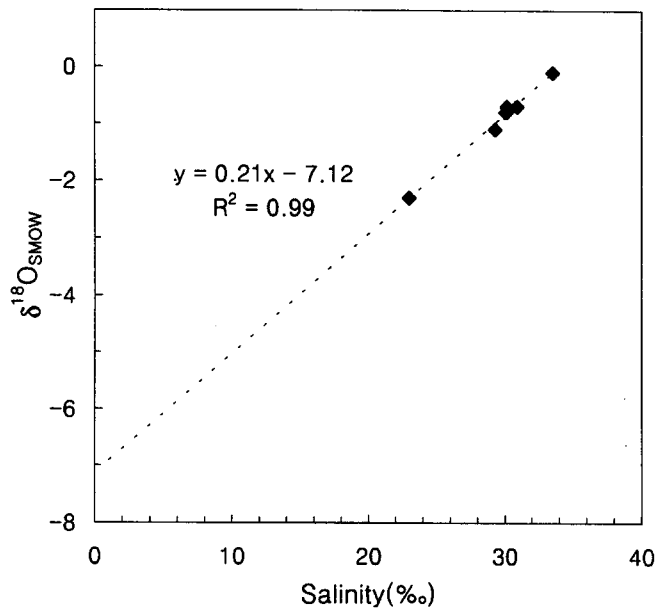
이번에 조사한 여름철 해수의 밀도와 규산염 사이에는 유의한 상관 관계가 나타났으나(Fig. 3) 분포 양상은 예상과는 전혀 다르게 나타났다. 규산염이 장강 유출수의 이동과 혼합의 지지자 역할을 하기 위해서는 밀도에 대한 규산염의 분포는 U자형 분포를 보여야 하나 관측 결과는 저밀도의 표층 해수에서 규산염의 농도가 가장 낮았고, 질산염과 인산염 또한 밀도에 대해 규산염과 같은 양상을 보여 규조류에 의해 왕성하게 소비되었음을 나타내었다. Tian *et al.*(1993)의 자료와 여름철 관측 결과를 연

계하여 판단해 볼 때 전선역에서 탁도가 줄게되면 규조가 번성하여 장강에서 공급한 많은 영양염이 소비되는 것으로 판단된다. 따라서 양자강 천퇴역에 발달하는 전선은 중국 대륙 기원 물질을 효과적으로 여과하는 역할을 하는 것으로 보여 환경 측면에서는 매우 바람직하지만 영양염의 경우에는 전선이 발달되면 영양염의 추적자로서의 기능이 상실되는 것으로 판단된다. 따라서 수계 파악에 사용되는 인자들은 전선역에서 보존성의 유지 여부를 검토한 연후 사용되어야 할 것이다. 하지만 김 등(1998)이 관측한 1997년 8월의 경우처럼 홍수에 의해 유출수의 세력이 워낙 강해 전선이 형성되지 않는다면 영양염은 좋은 추적자로서 사용될 수 있을 것으로 보인다.

여름철에 전선역에서 생물의 생산력이 높게 유지될 경우 생물 생산력에 관련된 화학 인자는 모두 보존성이 크게 약화될 것이 분명하다. 여기에는 영양염을 위시하여 용존 산소, 걸보기 산소 소모량, 자유 수소이온 농도(pH) 등 보편적으로 측정하는 인자들이 망라되어 있어 해수의 혼합을 정량화하기 위해서는 추적자를 추가로 발굴하여야만 가능하다. 표층 해수의 이동과 혼합이 관건이라면 표층 해수의 알칼리도(alkalinity)는 대기과 해수간 기체 이산화탄소의 교환에 전혀 영향을 받지 않으며 천천히 변화하는 특성을 지녀 바람직한 추적자 후보이다. 현재 활발하게 수행되고 있는 지구 온난화 연구에 힘입어 최근에 정밀하면서도 보다 간편한 분석법이 개발되었기 때문에(Yao and Byrne, 1998) 향후 해양조사에서 비중있게 다루어져야 할 필요가 있다고 여겨진다. Chen *et al.*(1995)의 자료에 따르면 염분에 대해 정규화된 알칼리도(normalized total alkalinity)는 쿠로시오의 표층 해수가 2.30-2.32 mmol kg<sup>-1</sup>인데 비해 중국 연안 해수는 최대 2.57 mmol kg<sup>-1</sup>에 이르므로 변수화하기에 충분히 큰 차이를 보인다. 하지만 연구 해역에 대해 적정법으로 측정된 알칼리도 자료는 아직 발표된 바 없으므로 염분으로 정규화된 알칼리도 추정 방법을(Millero *et al.* 1998) 적용하기에는 아직 이르다. 이 경우 분광분석법으로 측정된 pH는 알칼리도의 좋은 대안이 될 수 있다(Chen *et al.* 1995). 또한 알칼리도는 탄산염 광물이 저층에서 용해되므로 저층 해수에 적용할 경우 보존성이 약해지는 단점을 지니고 있다.

Chen *et al.*(1995)은 중국의 하천이 칼슘의 농도가 높은 특징이 있으므로 염분에 대해 정규화된 칼슘의 농도는 추적자로서 쓸만하다고 밝힌 바 있으나 실제 연구에서 사용하지 않았고 우리나라 하천의 특성이 알려지지 않았기 때문에 검토되어야 한다. 최근에 국내 학자들에 의해 들어 빈번하게 조사되고 있는 것은 칼슘과 같은 족에 속하는 라듐으로 <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra를 이와 김(1998)이 대한 해협 표층수에 대해 적용한 바 있으며 곧 다수의 논문이 발표될 것이므로 조만간 자료가 축적될 것으로 보인다(김, 1999a; 김, 1999b). 아직은 표층 이외의 자료가 매우 적은 편이며 방사능 측정법으로는 다수의 자료를 생산하는 것이 쉽지 않은 것이 단점이지만 동위원소 분석법이 정착되면 현재보다 많은 자료를 생산할 수 있다.

수온과 염분 이외에 보존적 특성이 가장 강한 추적자로는 해수의 산소 동위원소를 들 수 있다. 국내 연구자에 의해 발표된 자료가 아직 소수에 불과하여 기원 해수의 값을 추정해야 하기 때문에 불확실성이 큰 것이 단점이지만 국내에 연구 장비가 확



**Fig. 8.** A plot of surface seawater  $\delta^{18}O_{SMOW}$  against salinity in Aug. 1997 in the South Sea. Result a simple linear regression is shown together.

보되어 있는 만큼 곧 많은 자료가 축적될 전망이다. 여름철 남해의 표층해수에서(0-10 m) 염분이 23.0~33.5 psu 범위에 대해 측정된 7개 산소 동위원소 자료는(Fig. 8)  $-2.3 \sim -0.1\%$ 로서 직선 회귀식( $R^2=0.99$ )으로부터 염분 0인 장강 유출수의 산소 동위원소 값을 외삽하여 구하면  $-7.1\%$ 로 얻어지는데 이는 Kang *et al.*(1994)이 황해 연구 결과로 보고한 강물과 빗물의 산소 동위

원소 값인  $-7 \sim -9\%$ 의 무거운 경계에 해당한다. 장강 유출수의 산소동위원소 값은 지나치게 적은 수의 자료로부터 구한 것이지만 Zhang *et al.*(1990)이 발표한 우기의 장강 유출수의 값  $-7.06\%$ 와 아주 근사한 값이다. Kang *et al.*(1994)은 고염수의 기원으로 지목되고 있는 쿠로시오 표층수의 염분과 산소동위원소 값을 각기 34.40 psu,  $+0.2$  psu로서 보고하였다. 대마 난류의 중층수 염분은 이보다 높으므로 이 고염 단성분의 염분을 34.67 psu 정도로 높여 잡는다면  $+0.3\%$ 가 대마 난류 중층수의 산소 동위원소 값으로 적절하다고 판단된다. 황해의 저층 냉수에 대한 실측 자료가 없어 수온  $< 12^\circ C$ , 염분  $> 33.3$  psu인 조건으로 Kang *et al.*(1994)의 92년 9월 자료로부터 추정된 산소 동위원소 값은  $-0.5\%$ 이다. 각 기원 해수의 산소동위원소 값은 추후 실측 자료로서 보완되어야 하지만 각 기원 해수의 산소 동위원소 값은 분석 오차인 0.1%에 비해 훨씬 큰 차이를 보이므로 보조 추적자로 우선적으로 선호된다. 한편 용존 산소가 많이 소모된 중저층 해수의 산소 동위원소 비는 생물이 가벼운 산소를 선택적으로 사용하기 때문에 점차 무거워지게 되므로 용존 산소의 농도가 현저하게 적은 중저층 해수의 산소동위원소 값은 표층에 비해 추적자로서의 기능이 다소 약화될 수 있다.

겨울철에는 담수의 세력이 위축되어 산소 동위원소 값의 범위가 여름에 비해 현저하게 줄어 들었다. 이 시기에 고염수에서는 0.0%, 양자강 천퇴역에서는  $-0.6\%$ 인 해수가 발견되어 쿠로시오 표층수의 값 0.3%를 고려하면 남해의 해수는 겨울철에 약 1% 정도의 차이를 예상할 수 있다. 수온 차이가  $10^\circ C$ 에 이르고 염분 또한 4% 정도 변화를 보이고 있음에 비추어 추적자로서의 효용이 다소 취약하다고 평가되지만 활용에는 문제가 없을 것으로 판단된다. Zhang *et al.*(1990)에 따르면 갈수기에 장강 유출

**Table 1.** Nutrient concentrations ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ ) in the upper water column and the depth integrated values: a) Aug. 1997, b) Feb. 1998 in the South Sea, Korea.

a) Aug. 1997

Depth (sample no.)	nitrate+nitrite		phosphate		silicate		N/P
	range	mean (1s.d.)	range	mean (1s.d.)	range	mean (1s.d.)	
surface (38)	0.08 - 4.00	1.33 (0.97)	0.02 - 0.21	0.07 (0.04)	0.13 - 8.46	2.92 (2.06)	19.3
10 m (38)	0.08 - 7.17	1.69 (1.48)	0.01 - 0.36	0.08 (0.07)	0.13 - 8.40	3.11 (2.23)	22.3
20 m (37)	0.23 - 12.13	3.00 (2.66)	0.02 - 0.47	0.13 (0.09)	1.65 - 14.37	6.39 (3.25)	22.3
30 m (38)	0.43 - 17.60	5.31 (3.43)	0.01 - 0.82	0.27 (0.19)	0.80 - 18.66	9.66 (4.91)	19.6
40 m (31)	0.73 - 12.59	6.06 (3.04)	0.01 - 2.60	0.53 (0.44)	0.57 - 21.78	12.53 (4.90)	11.5
Depth Integrated ( $mmol \cdot m^{-2}$ )	30.1 - 722.2	321 (165)	6.3 - 58.6	23 (11)	84 - 1,296	637 (309)	14.8

b) Feb. 1998

Depth (sample no.)	nitrate+nitrite		phosphate		silicate		N/P
	range	mean (1s.d.)	range	mean (1s.d.)	range	mean (1s.d.)	
surface (52)	1.36 - 25.27	10.71 (5.46)	0.34 - 0.85	0.54 (0.13)	6.84 - 22.45	12.84 (3.65)	19.7
10 m (50)	1.14 - 19.05	10.17 (5.00)	0.34 - 0.85	0.54 (0.13)	7.06 - 22.35	12.70 (3.76)	18.9
20 m (49)	1.39 - 20.41	10.13 (5.36)	0.13 - 0.79	0.53 (0.14)	3.76 - 23.45	12.66 (4.15)	19.2
30 m (50)	2.10 - 26.31	10.96 (5.42)	0.36 - 0.88	0.55 (0.14)	7.22 - 22.85	12.88 (3.32)	19.9
Depth Integrated ( $mmol \cdot m^{-2}$ )	69.7 - 596.0	261 (125)	9.6 - 67.5	31 (13)	174 - 1,338	742 (279)	8.3

수의 산소 동위원소 값은 8.41‰로서 중국 대륙으로부터 유출된 담수의 영향권에 있는 양자강 천퇴역 해수와 서해 남부의 해수와는 차이를 보일 것으로 예상된다.

지금까지 남해의 수계를 파악하는데 유용하게 쓰일 수 있는 인자들에 대하여 논의한 것을 요약하면 염분, 수온, 산소 동위원소, 알칼리도(또는 pH),  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 의 순으로 다섯 종류의 인자가 사용이 권장되는 후보이다. 남해의 기원 해수의 수는 앞에서 논의한 바와 같이 네 종류로 단순화시킬 수 있다(Pang and Kim, 1998). 단순 혼합을 가정할 경우에는 3개의 인자만 있으면 일차 연립 방정식을 풀어 기원 해수간의 조성비를 계산할 수 있지만(Tomczak, 1981) 각 인자의 비보존성에서 비롯되는 오류의 크기가 어느 정도인지 알 수 없는 단점을 지닌다. Tomczak의 해법을 수정한 Thompson and Edward(1981)와 Mackas *et al.*(1987)의 방법을 사용하면 정확한 해가 아니라 각 비보존적인 각 추적자로 예측한 값과 실측 값 사이의 편차를 최소화하는 해를 구하게 되기 때문에 오류를 범할 확률을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 변수보다 많은 수의 추적자를 사용하는 방법은 매우 매력적으로 각 추적자에 대한 자료가 축적되면 앞으로 시도해 볼만한 흥미로운 과제로 생각된다. 어떠한 모델로 추정하던 기원 해수의 특징적인 영양염 값을 넣어주고 보존적 혼합을 하도록 허용하여 예측된 영양염 농도와 현장 측정 값과의 차이는 요긴하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 값들은 장강으로부터 유입된 물질이 어디로 얼마나 이동하는가, 남해는 황해로 물질을 공급하는가 아니면 반대로 받아들이는가 하는 등의 원천적인 질의에 대한 답변의 실마리를 제공할 것이다.

위에 열거한 방법들은 모두 단순 혼합에 의해 용존 물질의 분포가 결정되는 것을 가정하고 있기 때문에 비선형 확산이 중요하게 작용한다면 오류를 범할 소지가 있다. Kang *et al.*(1994)의 겨울철 산소 동위원소의 자료나 이 연구에서 측정된 겨울철 걸보기 산소 소모량, 영양염 등은 수온과 염분이 완전한 상하층 해수 혼합을 지시하고 있음에도 불구하고 수심에 따라 약간의 차이를 나타내 단순 혼합 모형의 사용에 다소 무리가 따를 수 있음이 드러났다. 앞으로의 연구에서 겨울철 수직 혼합과정의 물리학적 특성에 대한 이해가 필요한 것으로 판단된다.

## 요 약

여름철 남해의 해황에서 가장 주목받는 것은 표층 저염수의 거동으로, 장강이 담수와 함께 공급하는 막대한 양의 영양염의 분포는 보존성이 높은 염분과 비교하면 가장 잘 파악될 것으로 예상하였지만 실측 자료는 상관도를 비교한 환경 인자들 가운데 염분이 가장 저조한 상관도를 나타냈다. 이는 염전선역에서 영양염이 생물에 의해 활발하게 소비됨을 의미하므로 여름철 염전선의 위치와 강도는 영양염의 분포에 중요하게 고려되어야 할 요인으로 지목된다.

겨울철의 경우는 수온과 영양염 사이에 가장 유의한 관계가 나타났다. 이 경우 외양 기원인 난류와 대륙 주변에서 냉각되어 수직으로 혼합된 해수가 만나 이루는 열전선의 위치가 영양염의 분포에 가장 중요한 결정 요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

두 계절의 결과로 유추할 때 열염전선의 발달과 소멸은 전선

바깥쪽 해수에 영양염을 공급하는데 조절자의 역할을 담당한다. 전선역에서 활발한 생물의 활동은 육지 기원 물질의 여과지 역할을 할 것으로 기대되어 대륙 주변 전선역의 역할과 기능에 대한 연구는 강조되어야 할 것이다.

수심에 대해 적분한 질산염+아질산염, 인산염 그리고 규산염의 평균값은 여름철에 각각  $321 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $23 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $637 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었고 겨울철에는  $261 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $31 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $742 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 이었다. 질소:인:규소의 비는 여름철에 14.8:1:27.7이었고 겨울철에는 8.3:1:23.9이었다. 여름철의 질소대 인의 비는 Redfield 비와 근사하게 나타났는데 이는 영양염 분포가 생물의 활동에 의해 주도된 것으로 해석할 수 있다. 반면 겨울철에는 유입된 영양염이 생물에 의해 쓰이지 못해 여름과는 아주 다른 값을 나타내는 것으로 보인다. 이 값을 토대로 유추하면 봄철 식물의 광합성은 질소에 의해 제한을 받게 될 것이며 여름철에는 인에 의한 제약을 받는 것으로 나타났기 때문에 강수와 장강을 위시한 하천으로부터의 질소의 유입은 남해의 생태계를 유지시키는 데 중요하게 기여하는 것으로 추정할 수 있다.

남해 전역에 대한 영양염의 수지를 계산하기 위해서는 기원 해수간의 혼합에 대한 정량화가 선결되어야 할 것으로 판단되는데 다수의 보존성 추적자 활용이 권장된다. 남해의 대표적인 기원 해수는 네 가지로 보이므로 수온과 염분 이외에 추가로 필요한 추적자로는 해수의 산소 동위원소, 알칼리도,  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 가 권장된다. 다른 추적자의 활용에 의해 기원 해수의 정량화가 가능해지면 영양염의 실측 값과 예상 값의 차이로부터 수층에서 일어나는 생물 과정에 의한 유입 물질의 분포 과정에 대한 중요한 정보를 역추정할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

이 연구는 학술진흥재단의 1997년도 과학기술기초중점연구비의 지원에 의해 수행되었습니다. 현장 조사에 큰 도움을 주신 담양호 김정창 선장님을 비롯한 승조원께 감사의 뜻을 전합니다. 논문을 심사하여 주신 두 분의 심사위원께도 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김기현, 1999a. 다수의 추적자를 사용한 동해 유입수의 기원과 혼합과정 연구. 97해양과학연구보고서, 52 pp.
- 김향배, 1999b. 남해와 중국 주변해역에서의 Ra 동위원소를 이용한 수괴의 기원 및 해수의 체류시간. 석사학위논문, 부경대학교, 부산, 49 pp.
- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암, 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상저염수 현상과 영양염류의 분포특성. 한국해양학회지 바다, 3: 165-170.
- 이동섭, 김기현, 1998.  $^{228}\text{Ra}$ 을 이용한 이상 저염 대마난류수의 기원 추적 연구. 한국해양학회지 바다, 3: 175-182.
- 한국해양연구소, 1993. 한국 해역 해양 환경도, 제2권 남해. 158 pp.
- Benson, B.B. and D. Krause Jr., 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnol. Oceanogr.*, 29: 620-

- 632.
- Bo, L., G. Feng and Y. Cui, 1993. The distribution of N/P and its application to distinguish water masses in the Kuroshio and its adjacent area of the East China Sea. *Essays on the Investigation of Kuroshio*, **5**: 380–386.
- Broecker, W.S. and T.-H. Peng, 1984. *Tracers in the Sea*. LDGO Press, New York, 690 pp.
- Chen C.T.A., R. Ruo, S.C. Pai, C.T. Liu and G.T.F. Wong, 1995. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan. *Cont. Shelf Res.* **15**: 19–39.
- Chen, S., S. Yao, 1994. Division of hydroclimatic area over China seas. 1. Principal component analysis. *Acta Oceanol. Sin.*, **13**: 31–46.
- Clayton, T.D. and R.H. Byrne, 1993. Spectrophotometric seawater pH measurement: total hydrogen ion concentration scale calibration of m-cresol purple and at-sea results. *Deep-Sea Res.* **40**: 2115–2129.
- DOE. 1994. Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water. Ver. 2., edited by A.G. Dickson and C. Goyet. ORNL/CDIAC-74.
- Epstein, S. and T.T. Mayeda, 1953. Variation of  $^{18}\text{O}$  content of waters from natural sources, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**: 213–224.
- Hall, J., S.V. Smith, and P.R. Boudeau (eds). 1996. Report on the International Workshop on Continental Shelf Fluxes of Carbon, Nitrogen and Phosphorus. LOICZ/R&S/96-9, LOICZ, Texel, The Netherlands. 50 pp.
- Imai, M., K. Fushimi, and J.I. Ohyama, 1994. Distribution and behaviors of chemical substances in the East China Sea and Yellow Sea. *Oceanogr. Mag.* **44**: 59–75.
- Jiang, G. and Y. Wang, 1990. Distribution of dissolved oxygen and nutrients in winter circulation in East China Sea. *Mar. Sci. Bull.*, **9**: 25–32.
- JGOFS, 1996. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Studies (JGOFS) Core Measurement. JGOFS Report No. 19, 210 pp.
- Kang, D.J., C.S. Chung, S.H. Kim, G.H. Hong and K.R. Kim, 1994. Oxygen isotope characteristics of seawater in the Yellow Sea. *La Mer*, **32**: 279–284.
- Kim, K., K.-R. Kim, T.S. Rhee, H.K. Rho, R. Limeburner and R.C. Beardsley, 1991. Identification of water masses in the Yellow Sea and the East China Sea by cluster analysis. In: *Oceanography of Asian Marginal Seas*, edited by Takano, K. *Elsevier Oceanography Ser.* **54**: 253–267.
- Koroleff, F. 1983. Determination of silicon. In: *Methods of Seawater Analysis*, edited by Grasshoff, K. M. Ehrhardt and K. Kremling, Verlag Chemie, pp. 164–183.
- Liu, S.X., S.X. Han and Y.K. Wei, 1984. Analysis of water-masses of northwestern Dong Hai Sea and their relations to fishing grounds. *J. Fish. China*, **8**: 125–133.
- Mackas, D.L., K.L. Denman and A.F. Bennett. 1987. Least squares multiple tracer analysis of water mass composition. *J. Geophys. Res.* **92**(C3): 2907–2918.
- Milleo, F.J., K. Lee and M. Roche, 1998. Distribution of alkalinity in the surface waters of the major oceans. *Mar. Chem.*, **60**: 111–130.
- Pang I.-C. and K.-H. Kim, 1998. Seasonal variation of water mass distribution in the eastern Yellow Sea and the Yellow Sea warm current. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **33**: 41–52.
- Qi, J., F. Li and Y. Su, 1991. A study on making and application of multivariate membership function of water masses. *J. Ocean. Univ. Qingdao*, **21**: 15–33.
- Su, Y., 1980. The TS-comparison method for determining the boundary of modified water-masses and the analysis of modified water-masses in the western area of the East China Sea. *Acta Oceanol. Sin.*, **2**: 1–16.
- Suk, M.-S., G.-H. Hong, C.-S. Chung, K.-I. Chang and D.-J. Kang, 1996. Distribution and transport of suspended Particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **31**: 55–63.
- Svedrup, H.U., M.W. Johnson and R.H. Fleming, 1942. *The Oceans*. Prentice-Hall, Tokyo, 1087 pp.
- Tian, R.C., F.X. Hu, J.M. Martin, 1993. Summer nutrient fronts in the Changjiang (Yantze River) Estuary. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **37**: 27–41.
- Thompson R.O.R.Y and R.J. Edwards, 1981. Mixing and water-mass formation in the Australian subarctic. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**: 1399–1406.
- Tomczak, M., 1981. A multi-parameter extension of temperature/salinity diagram techniques for the analysis of nonisopycnal mixing. *Prog. Oceanogr.*, **10**: 173–192.
- Yao, W. and R.H. Byrne, 1998. Simplified seawater alkalinity analysis: use of linear array spectrometers. *Deep-Sea Res.*, **45**: 1383–1392.
- Wang, Y., H. Dong and D. Ren, 1992. The preliminary study on the distribution of nutrient and chemical characteristics of water system in the East China Sea in summer and winter. *Essays on the Investigation of Kuroshio*, **4**: 280–288.
- Wong, G.T.F., S.C. Pai, K.K. Liu, C.T. Liu, C.T.A. Chen, 1991. Variability of the chemical hydrography at the frontal region between the East China Sea and the Kuroshio North-east of Taiwan. *Est. Coast. Shelf. Sci.*, **33**: 105–120.
- Worthington, L.V., The water masses of the world ocean: Some results of a fine-scale census. In: *Evolution of Physical Oceanography*, edited by Warren, B.A. and C. Wunsch, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp 42–69.
- Zhang, J., R. Letolle, J.M. Martin, C. Jussierand and J.M. Mouchel, 1990. Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuary systems. *Cont. Shelf Res.* **10**: 369–384.

1999년 4월 16일 원고 접수

1999년 9월 28일 수정본 채택