

## 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리·화학적인 특성

양재삼 · 최현용 · 정해진 · 정주영 · 박종규<sup>1</sup>

군산대학교 해양학과, <sup>1</sup>인제대학교 환경연구소

### The Outbreak of Red Tides in the Coastal Waters off Kohung, Chonnam, Korea: 1. Physical and Chemical Characteristics in 1997

JAE SAM YANG, HYUN-YONG CHOI, HAE JIN JEONG, JU YOUNG JEONG  
AND JONG KYU PARK<sup>1</sup>

Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea  
<sup>1</sup>The Institute of Environmental Research, Inje University, Kimhae 621-749, Korea

비내만성 적조가 빈발하는 남해안 고흥 해역에서 1997년 5월에서 10월까지 적조발생 이전, 도중 그리고 이후 등 총 6차에 걸쳐 해수 물성 및 영양염의 분포를 조사하였다. 연구해역의 해수특성 변화 및 수층구조는 국지적인 기상조건이나 인접한 육지의 영향보다는 외해역에서 유입되는 해수의 특성에 따라 변화하였다. 특히 적조 발생기간인 8월에서 9월 사이에 극심한 해수환경의 변화가 발견되었다. 적조발생 전에는 주변환경에 비하여 높은 농도의 용존무기질소가 관측된 반면, 적조가 발생한 기간에는 오히려 농도가 낮아졌다. 그러나 용존무기인 농도의 변화는 발견되지 않았다. 연구해역의 북측 내만은 인근 육지에서 공급된 용존무기질소의 양이 전체 유입량의 70%를 차지하고, 그 외의 해역에서는 외해로부터 유입된 수지(flux)가 전체 유입량의 98%로 주 유입원이 된다. 이와 같이 높은 영양염과 고온·저염의 특징을 가진 외해 공급원은 하절기에 남해를 통과하는 고온·저염의 특성을 가진 양자강 회석수일 것으로 추정되었다. 특히 고온·저염수가 출현한 8월 21일에 적조생물 *Gyrodinium impudicum*이 처음 발견되었고, 해수특성이 다시 크게 달라진 9월 22일에 적조가 소멸되었다. 이러한 사실은 외해역에서 연구해역으로 간헐적으로 유입되는 외해수의 출현과 적조의 발생 및 소멸이 깊은 관련이 있음을 제시하는 것으로 생각되며, 이에 대한 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Physical characteristics and nutrient distributions in seawater were investigated to understand the mechanism of red tide outbreak in coastal waters off Kohung area. To identify any physical and chemical differences before, during and after the red tide outbreaks, 6 times of field observations have been carried out from May to October, 1997. We found that major environmental properties of the seawater in the study area were determined not by the local meteoric conditions or nearby-land influences, but by the intrusion of seawater from offshore. In particular, extreme environmental variations in seawater were found during the period of red tide outbreak from August to September. Before the red tide outbreak, high concentrations of DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen) were found in seawater, but they decreased during the outbreak. Whereas no significant variations of DIP(Dissolved Inorganic Phosphate) were found. For the water mass in the semienclosed northern part of the study area, local nutrient sources originated from nearby-lands were estimated to cover 70% of total DIN input, but the rest part of the water mass in the study area, sporadic intrusion of offshore water mass could account for the major source of DIN supply. An offshore water mass influenced by Yangtze river effluent was suggested as one of the candidates with its high nitrate contents, high seawater temperature and low salinity. A red tide related phytoplankton, *Gyrodinium impudicum*, was found in seawater on the 21th day of August and, on the same day, a unique water mass with high temperature and extremely low salinity suddenly appeared in the study area. On the 22th day of September, after one and half month duration of red tide we found that red tide had disappeared simultaneously with the intrusion of new water mass with different characteristics.

### 서 론

신라시대부터 남해안에서 적조가 발생하였다는 기록이 삼국유사와 삼국사기에 있을 정도로 적조는 여름철 남해안의 자연적 현

상의 일부로 여겨졌다. 그러나 최근 연안역에 양식장 시설이 확장되고, 적조 또한 독성화하여 국내양식어류와 굴 등의 피해액이 증가하여 1995년도에 약 764억원에 달하였다(국립수산진흥원, 1997; 해양수산부, 1999).

마산만과 같은 반폐쇄 해역이나 하구에서 발생하는 내만성 적조는 육상기원 오염물질에 의하여 발생한다는 이론이 광범위하게 수용되었다. 그러나 남해안 외해에서 발생하는 적조는 몇가지 점에서 마산만 등에서 발생하는 내만성 적조와 다른 특징을 보이고 있다: ① *Cochlodinium polykrikoides* 등 외편모조류에 의한 유독성 적조는 8월 내지 9월에 고흥 연안에서 최초 발견되고, ② 이 적조는 시간의 경과에 의하여 동쪽으로 전파되는 듯한 경향을 보이며, ③ 유독성 적조는 내만이 아닌 곳에서 먼저 발생한다. 따라서 이러한 남해안의 유독성 적조의 발생기작은 기존에 알려진 내만성 적조와는 다른 발생기작을 가지는 것으로 생각된다.

적조를 일으키는 원인에 관하여 수많은 보고가 있으나, 이를 요약하면 다음과 같다. ① 화학적인 요인, 예를 들면, 고농도의 영양염(Wong *et al.*, 1998), 육지에서 기인한 성장촉진제(Matsunaga *et al.*, 1984)등, ② 물리적인 요인(Steidinger *et al.*, 1998), 즉 수괴의 안정성, 높은 수온, 강한 태양광 등, ③ 생물학적인 요인, 즉 포식자와 피식자간의 관계, 영양염 요구량의 차이(Doucette and Harrison, 1990)등 생물 상호간의 관계를 들 수 있다. 이 중에서 영양염에 관한 연구는 1980년대 초부터 진해만이나 마산만과 같은 반폐쇄형 만에 대해서 집중적인 연구가

수행되었다(Yang and Hong, 1982; 양 등, 1983; 이와 곽, 1986). 이러한 반폐쇄성 만으로 인근 도시에서 고영양염을 함유한 도시 하수가 유입되면 자연히 저염분의 표층수가 부영양화가 되고, 따라서 적조의 발생원인이 되었다. 이러한 배경 하에서 적조와 질산염과의 관계(이와 유, 1990), 규산염과의 관계(이 등, 1981; 양 등, 1983)에 대한 보고가 있는 반면에 적조의 발생과 질산염의 농도가 역의 상관관계가 있다는 보고(Chang, 1990)도 있으며, 부영양화된 수역에서의 영양염은 더 이상 적조발생의 제한조건이 아니라는 주장도 제시되고 있다(Mihnea, 1993).

이상을 종합하면, 적어도 규조류 적조의 경우 질산염, 인산염과 함께 규산염의 농도가 영향을 주지만, 외편모조류 적조에 있어서는 적조생물의 생물량과 영양염의 농도 사이에는 직접적인 상관관계가 없고 다른 물리적인 조건들이 오히려 필수조건이 된다는 의견이 제시되고 있다(Borkman *et al.*, 1993; Dahl and Tangen, 1993; Figueiras and Rios, 1993; Pitcher *et al.*, 1993).

적조발생과 관련된 여러 가지 환경요인들은 생태계 내에서 상호 연관되어 있으므로 각각의 요인을 따로 분리하여 그 중 가장 중요한 영향을 주는 인자를 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 그러므로 적조가 발생하였을 경우 어느 것이 가장 중요한 요인인

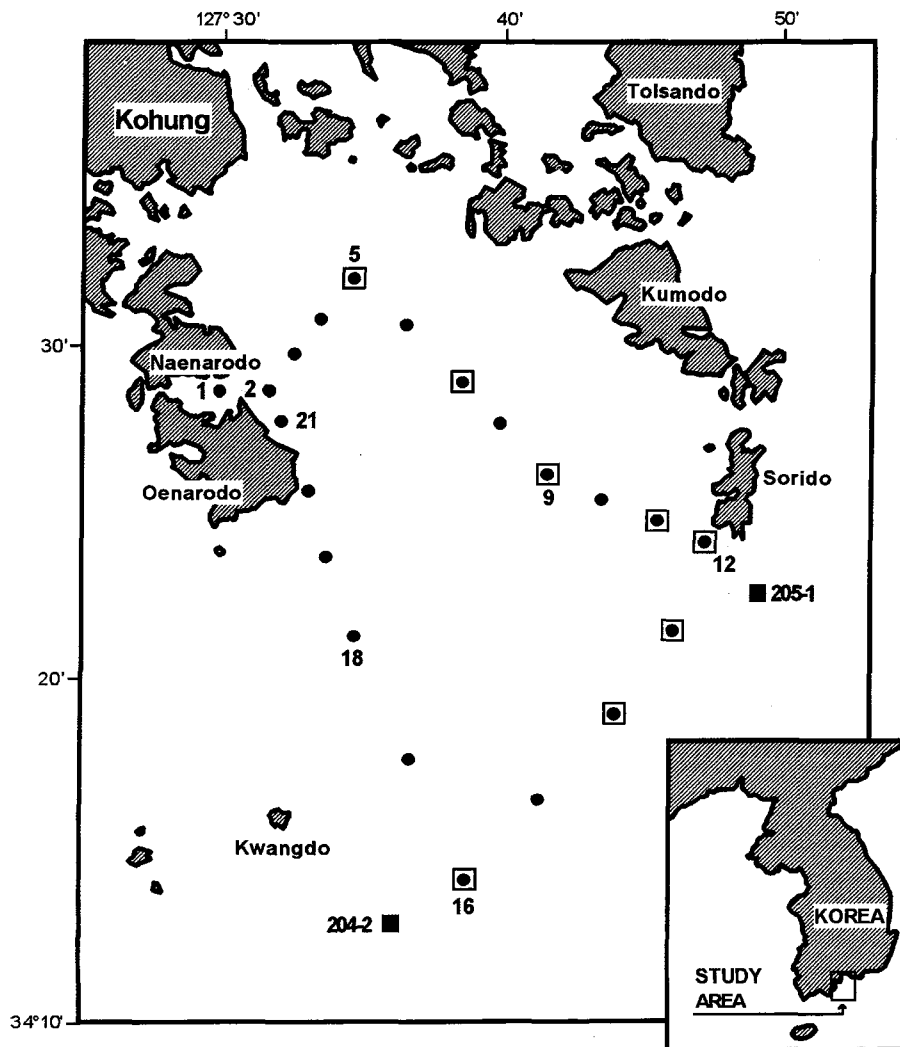


Fig. 1. Locations of the study area: Kohung, Korea. ●, CTD casting; □, Core and water sampling; ■, NFRDI station.

**Table 1.** Sampling schedules from 16 May to 22 September, 1997

Stage	Date(1997)	Parameters measured
Background	16, MAY.	Fluorescence, CTD, Cell Counting
	20, JUN.	Sediment Coring, CTD, Cell Counting, Mooring(nutrient, Chlorophyll- <i>a</i> , SS)
Active Growth	1, AUG.	Nutrient, CTD, Cell Counting, Sediment Coring
	21, AUG.	Nutrient, Fluorescence, CTD, Cell Counting
Red Tide Outbreak	24, AUG.	
Declining	27, AUG.	Nutrient, Fluorescence, CTD, Cell Counting
Extinction	22, SEP.	Nutrient, Fluorescence, CTD, Cell Counting

지 판단하기에 매우 어려울 뿐만 아니라 설명하지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구진은 남해안 유독성 적조 발생기작 연구의 일환으로 1997년 춘계에서 추계까지 고흥연안 해수에 대한 물리, 화학 및 생물학적 연구를 동시에 실시하였다. 적조 발생과 관련이 예상되는 요인들을 중심으로 ① 일반적으로 적조가 발생하지 않았을 때, 즉 배경조건인 일반 해양학적인 경향을 파악하고, ② 적조발생 전후의 영양염의 농도변화와 염분, 수온, 강수량 등을 분석하고, ③ 이로써 적조의 발생과 진행에 대한 이해를 하고자 하며, ④ 가능하다면 독성 적조의 시작을 초기에 예보하는데 필요한 인자를 제시하는 것이다. 물리적인 요인은 해수의 특성을 결정하는 염분과 수온의 시공간적인 변화에 중점을 두었으며, 화학적인 인자는 적조생물의 성장에 관련이 있는 영양염인 용존무기질소와 용존무기인의 시공간적인 농도변화에 초점을 두었으며, 기타 생물학적인 요인들에 관하여는 다른 보고(정 등, 2000)에서 다루어질 것이다.

## 연구해역

연구지역은 섬으로 둘러싸인 만과 같은 지형구조로서 북으로는 여자만을, 동과 서로는 나로도와 소리도로 둘러싸여 있으며, 남으로는 외해로 열린 구조로 되어있다(Fig. 1). 연구지역의 평균 수심은 22 m이며, 남북으로 50 km, 동서로 25 km의 범위를 포함한다. 연구지역은 지리적으로 세 가지 다른 성격을 가진 북쪽의 내만성 해역, 남쪽의 외해역 그리고 이 사이의 경계해역으로 구분된다.

## 재료 및 방법

해양관측은 1997년 5월에서 9월까지 6회에 걸쳐 실시되었다. 연구해역의 기본적인 해양조건을 이해하기 위한 배경조사를 위한 시기(5월 16일, 6월 20일), 적조 발생 전(8월 1일), 적조생물 초기 발생(8월 21일), 적조 최초 발령일(8월 24일) 이후의 적조 때 발견시기(8월 27일), 그리고 적조 소멸 후의 정상적인 자연 상태로 환원시기(9월 22일)이다. 각각의 조사기간 동안 수행된 구체적인 내용은 Table 1에 표시하였다.

**수온, 염분 및 형광:** 수온, 염분 및 형광은 CTD(SeaBird, SBE-19)를 이용하여 측정하였다.

**시료채취:** 표층 해수는 버킷으로 채수하였고, 저층수는 니스킨 채수병으로 채수한 후 미리 산으로 세척한 1 L 폴리에틸렌 병에

저장한 후 드라이아이스가 채워진 아이스박스에서 냉동하였다. 용존무기질소와 용존무기인은 시료 채수후 냉동보관 한 다음 1주일 이내에 분석하였다. 퇴적물 시추는 Gemini Twin Corer로 채취하여 1~3 cm 간격으로 퇴적층별로 시료를 절단한 후 원심분리기로 공극수를 채취하여 해수의 분석과 동일한 방법으로 영양염을 분석하였다.

**화학분석:** 부유현탁물질은 시료 500 ml를 GF/C 여과지로 여과한 후 건조기로 103°C에서 1시간 30분 건조하여 함량을 측정하였다. 인산염은 폴리브덴산 암모늄용액, 황산, 아스코르빈산, 타르타르산 안티모닐 칼륨용액의 혼합 시약으로 반응시킨 후 885 nm에서 정량 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984). 암모늄은 페놀로 고정 후 니트로프루시드 나트륨용액, 알칼리용액, 차아염소산 나트륨용액, 산화제로 반응시킨 후 640 nm에서 정량 측정하였다(Solorzano, 1969). 아질산염은 숄퍼닐 아미드용액과 나프틸에틸렌디아민이염산염용액으로 반응시킨 후 543 nm에서, 질산염은 Cd-Cu 환원 칼럼을 통하여 아질산염으로 환원시킨 후 아질산염과 동일한 방법으로 정량 측정하였고(Parsons *et al.*, 1984), 규산염은 폴리브덴산 암모늄용액, 메틸용액, 옥살산용액, 황산을 이용하여 810 nm에서 정량 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984). 흡광도 측정은 분광광도계(UV-160A, Shimadzu)를 사용하였다.

## 결 과

### 표층 수온 및 염분의 변화

6차에 걸쳐 조사한 연구해역의 표층수온과 표층염분(표층~5 m)의 평균값을 T-S Diagram에 도시하였다(Fig. 2). 1차 조사(5월 16일)에서 2차 조사(6월 20일)까지는 연구해역의 염분이 전체적으로 33.5 psu 이상의 고염분을 유지하다가 3차 조사(8월 1일) 이후에는 연구해역의 염분이 32.5 psu 이하로 감소하였다. 8월중 조사된 4차(8월 21일)와 5차(8월 27일) 조사에는 연구해역의 염분이 32.0 psu 이하로 낮아져 관측기간 중 가장 낮은 염분을 기록하였으며, 9월 22일에는 다시 염분이 증가하는 변화를 보이고 있다. 이와 같은 표층염분의 변화는 하계에 저염분이 나타나는 남해의 계절적인 변화와 일치한다. 그러나 1차와 2차 조사 시기 사이에 내린 고흥지방의 총 강수량은 173.8 mm로 염분의 저하요인이 있었음에도 불구하고 연구해역의 평균 염분은 오히려 0.16 psu 증가하였으며, 또한 5차와 6차 조사 사이에도 강수량이 21.0 mm로서 염분의 강하 요인이 다소 있었으나 염분은 오히려 0.62 psu 증가하였다(Table 2). 이 결과는 연구해역의 계절적인

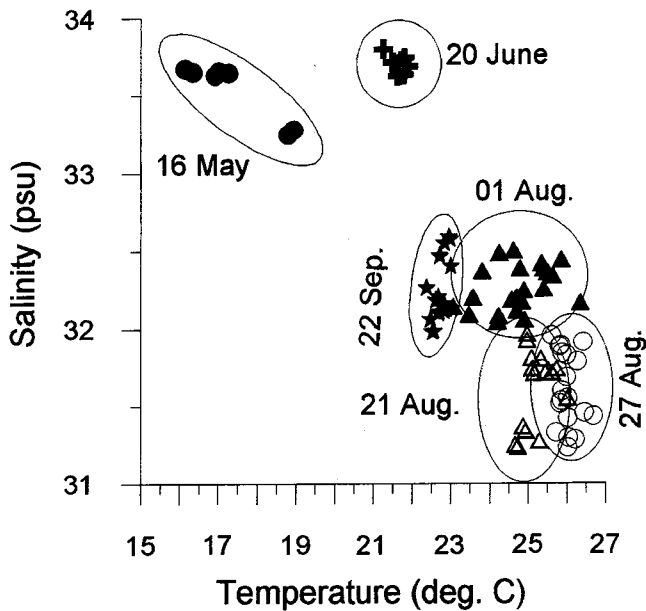


Fig. 2. T-S diagrams of surface water of study area from 16 May to 22 September, 1997.

Table 2. Rainfall measured at the Kohung Meteorological Station and mean surface salinity of the study area

Date	Rainfall (mm)	Mean salinity (psu)	Salinity variation (psu)
16, May		33.54	
20, June	173.8	33.70	+0.16
01, August	374.5	32.26	-1.44
21, August	212.5	31.61	-0.65
27, August	1.0	31.61	-
22, September	21.0	32.23	+0.62

염분변화가 연구해역에 내린 강수량에 의한 영향 이외에도, 주변 해역에서 유입되는 해수에 의해 결정될 수 있음을 보인다.

**적조 발생 전후의 수층구조 변화**

적조발생 전부터 적조가 소멸될 시기인 8월과 9월에 관측된 수온과 염분자료에서 나타나는 가장 뚜렷한 특징은 수층구조의 변동과 해수 물성의 급격한 변화이고(Fig. 3), 각 시기의 수온과 염분분포의 특징은 다음과 같다.

3차 조사(8월 1일, 적조 발생 이전)에서 수온 및 염분은 표층에서 저층까지 안정적인 성층구조를 보였다. 약 15 m 깊이를 경계로 상층의 수온 20°C 이상, 염분 33 psu 이하인 해수가 분포하고, 15 m 이심에는 수온 20°C 이하, 염분 33 psu 이상인 해수가 분포하였다.

4차 조사(8월 21일, 적조 발생 초기)에서는 수심이 가장 깊은

정점 12에서도 저층 해수가 수온 20°C 이상, 염분 33 psu 이하로 관측되어 8월 1일에 비해 연구해역의 전 수층이 고온 저염화된 현상을 보였다. 이로 인해 수온약층 및 염분약층의 위치가 깊어지고 수층 전체가 균일화되는 특징을 보였다.

5차 조사(8월 27일, 적조 진행)에는 불과 6일만에 다시 강력한 수온 약층이 생성되었다. 25 m 이심에 수온 20°C 이하, 염분 33 psu 이상인 저온 고염수가, 표층에서 약 20 m 깊이까지는 32 psu 이하의 고온 저염수가 분포하여 20 m와 30 m 깊이 사이에 강력한 수온약층 및 염분약층이 형성되었다.

6차 조사(9월 22일, 적조 소멸)에는 다시 수온 약층의 구조가 약화되는 등 수층의 구조가 크게 변화하였다. 수심이 낮은 북측 내만의 정점들을 제외하면, 5차 조사에 비해 표층에서 약 20 m 깊이까지의 수층의 염분은 32.5 psu 이상으로 급격히 증가하고 수온은 크게 낮아졌다. 하지만 수심이 20 m 이심에서는 8월 27일에 비해 수온은 오히려 증가하고 염분은 상대적으로 낮아져 4차 조사의 단면구조와 유사한 특징을 보였다.

연구해역의 내만과 외해역을 포함하는 남북방향의 단면의 수층구조를 종합하면, 연구해역의 수온과 염분값 자체뿐만 아니라 수층구조도 시공간적으로 급격하게 변하고 있어 연구해역의 해수 특성에 영향을 미치는 요인이 강수량 및 태양복사열과 같은 국지적인 기상조건 외에도 다른 물리적 요인이 존재함을 알 수 있다.

**용존무기질소와 용존무기인의 변화**

연구지역을 북측의 내만(정점 5와 9), 경계역(정점 11), 그리고 외해역(정점 16)으로 구분하여 표시한 용존무기질소와 용존무기인의 변화추이는 Fig. 4와 같다. 전반적으로 하절기 영양염 농도로는 매우 높은 농도의 용존무기질소가 8월 1일 연구해역 전체에서 출현하였고, 적조생물이 활발하게 증식한 8월 21일부터 감소하였으나 용존무기인은 주목할만한 변화를 보이지 않았다.

**형광 분포**

적조의 발생기간: 적조생물의 왕성한 성장기간인 1997년 8월 21일부터 27일 그리고 소멸시기인 9월 22일 사이의 형광 변화는 Fig. 5에 있다. 가장 북측 내만에 위치한 정점 5는 적조 발생기간 동안 표층에 높은 형광을 나타내고, 우점종은 소형규조류인 *Skeletonema costatum*인 반면, 외해역과의 경계부분인 정점 9와 11에서는 외편모조류인 *Gyrodinium impudicum*이 우점하는 적조 때가 발견되었다(정 등, 1999). 가장 외해역인 정점 16에서 낮은 농도의 형광은 발견되지 않았다. 9월 22일 조사에서 적조 생물에 의한 떠는 소멸되었다.

**토 의**

**물리해양학적인 해석: 수층구조의 변화와 원인**

8월에서 9월 사이에 수행된 4회 조사자료에서 분석된 수층의 단면구조는 수온 20°C, 염분 33 psu를 기준으로 볼 때 8월 1일과 27일은 안정된 성층구조를 나타내나, 이에 반해 8월 21일과 9월 22일은 심한 변화를 보이고 있어 연구해역의 해수의 물리적인 환경은 안정적인 환경과 극심한 변화가 교대로 나타나는 것으로 해석된다. 또한 수층의 구조가 크게 바뀐 8월 21일과 9월

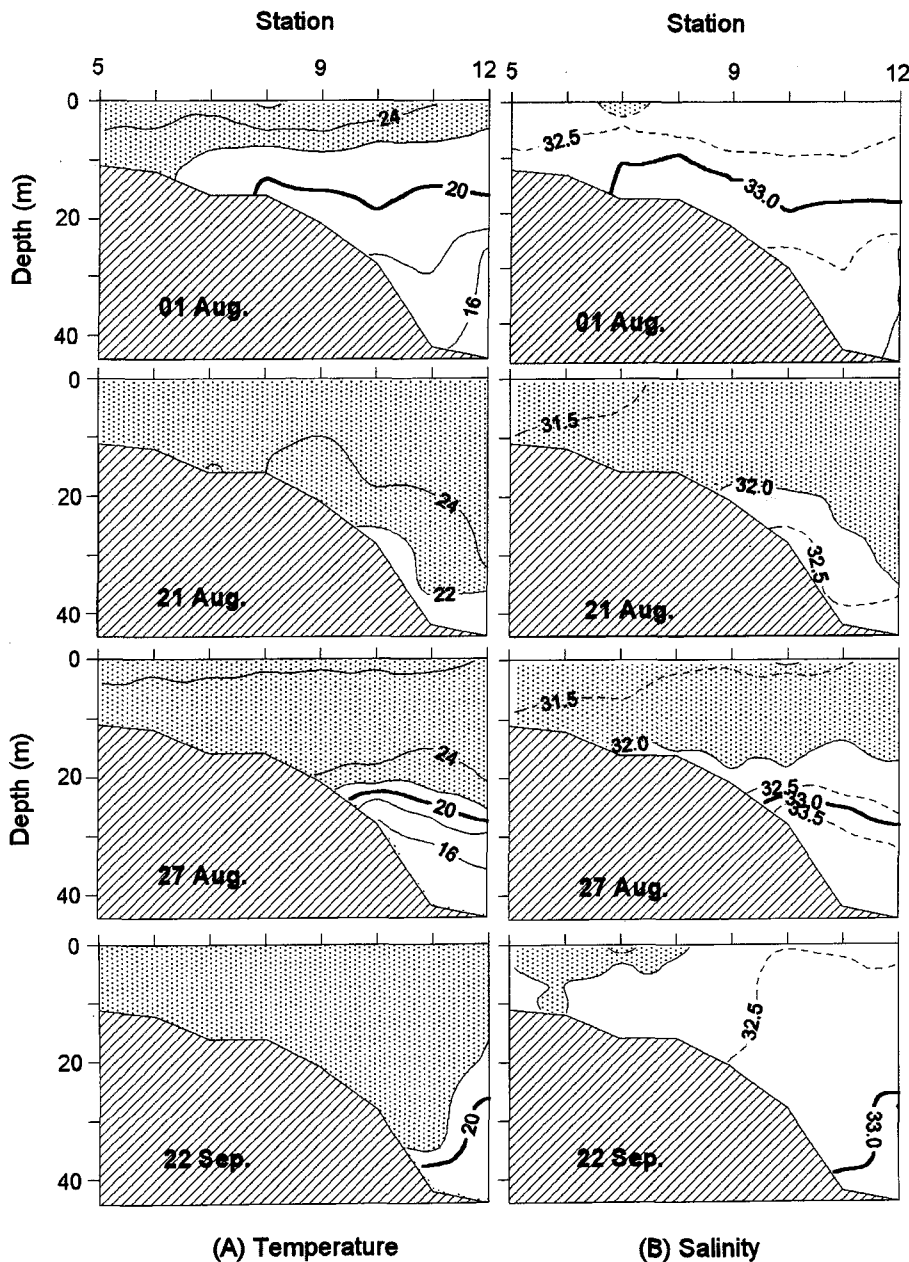


Fig. 3. Vertical sections of hydrographic properties, (A) Temperature in deg. C, (B) salinity in psu. The observation date is marked in each figure.

22일에는 상층 해수의 염분이 직전의 관측시기의 염분에 비해 크게 변화하는 특징을 보이고 있다. 이와 같은 해수 특성의 변화는 인접 육지에서 유입되는 담수 및 국지적인 기상에 의한 원인으로 볼 수 있지만, 이외에도 특성이 다른 해수가 본 연구해역으로 유입되는 경우에 나타날 수 있다. 연구해역 서쪽에 위치한 득량만과 거금수로의 경우(이와 허, 1983; 김 등, 1995; 추 등, 1997) 국지적인 기상 및 육지에서 유입되는 담수가 수온 및 염분의 계절변화를 일으키는 주요 원인으로 제시된 바 있어, 먼저 연구해역의 국지적인 기상이나 육지에서 공급된 담수 유입이 연구해역의 염분 변화를 일으킬 가능성에 대해 검토하였다.

8월 1일과 8월 21일 사이에 관측된 수층의 저염화가 인접한 육지에서 공급된 담수나 직접적인 강수량에 의해 일어날 경우 필요한 담수량을 산출하였다. 이를 위해 Fig. 3에 도시한 단면의

상층 20m의 해수의 평균염분이 20일 사이에 33.0 psu에서 32.0 psu로 약 1 psu 감소한다고 가정하고 이 기간동안 해수의 유출과 유입이 없고 빗물에 의해서만 염분이 변한다고 가정하자. 강수량을 X mm로 하고 염분이 변하기 전과 후의 전체 염량은 같아야 하므로 아래와 같은 염 보존식(조 등, 1995)이 성립한다.

$$20 \text{ m} \times 33 \text{ psu} = (20+X) \text{ m} \times (33-1) \text{ psu}$$

$$X=0.625 \text{ m}$$

단위 표면적 당 약 625 mm의 담수가 필요하고 연구해역 전체로는 약 2억 5천만톤의 담수가 필요하다. 그러나 이 기간 동안에 연구해역에 내린 총 강수량은 212.5 mm(Table 2)로 저염화에 필요한 담수량의 30%에 불과하고, 또한 연구해역 주위에는 연구해역으로 직접 유입되는 대규모 하천이 없으므로 국지적인

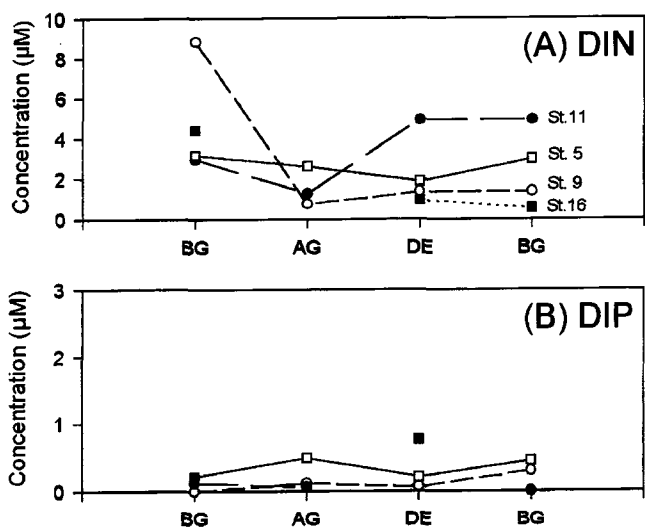


Fig. 4. Variations of (A) DIN and (B) DIP from the surface water during the summer season. BG: Background (1, Aug., 22, Sep.), AG: Active Growth (21, Aug.), DE: Declining (27, Aug).

기상이나 육지에서 공급된 담수 유입이 연구해역 저염화의 직접적인 원인이 될 가능성은 희박하다. 따라서 강우량에 의하여 담수 공급량이 결정된다고 가정하면, 담수 공급량과 염분의 변화가 일치하지 않는 모순이 발생하므로 다른 담수공급원을 찾아야 한다. 만약 8월 1일과 21일의 연구 사이에 고온·저염의 특성을 가진 해수가 연구해역으로 유입되면, 이러한 현상이 나타날 수 있다. 본 연구 해역이 남해 외해역과 남측으로 연결되어 있는 반폐쇄 해역이고, 남해 외해역은 하계에 양자강 희석수라 불리는 고온·저염수가 통과하는 해역이라는 점을 고려하면(조 등, 1995; 정과 신, 1996), 8월 21일에 관측된 해수의 저염화 현상의 원인은 남해 외해역에서 연구해역으로 유입된 고온·저염의 양자강 희석수일 가능성이 있다. 실제로 외해역에서 물성이 다른 해수가 일시적으로 연안역으로 유입되는 경우는 연안역에서 흔히 일어날 수 있는 현상으로, 뉴질랜드와 미국의 멕시코만의 경우에는 이와 같은 외해수의 유입과 적조발생과의 관련성이 보고된바 있다(Sharples, 1997; Steidinger *et al.*, 1998).

적조 소멸시기인 9월 22일에 나타난 해수특성 및 수층구조 역

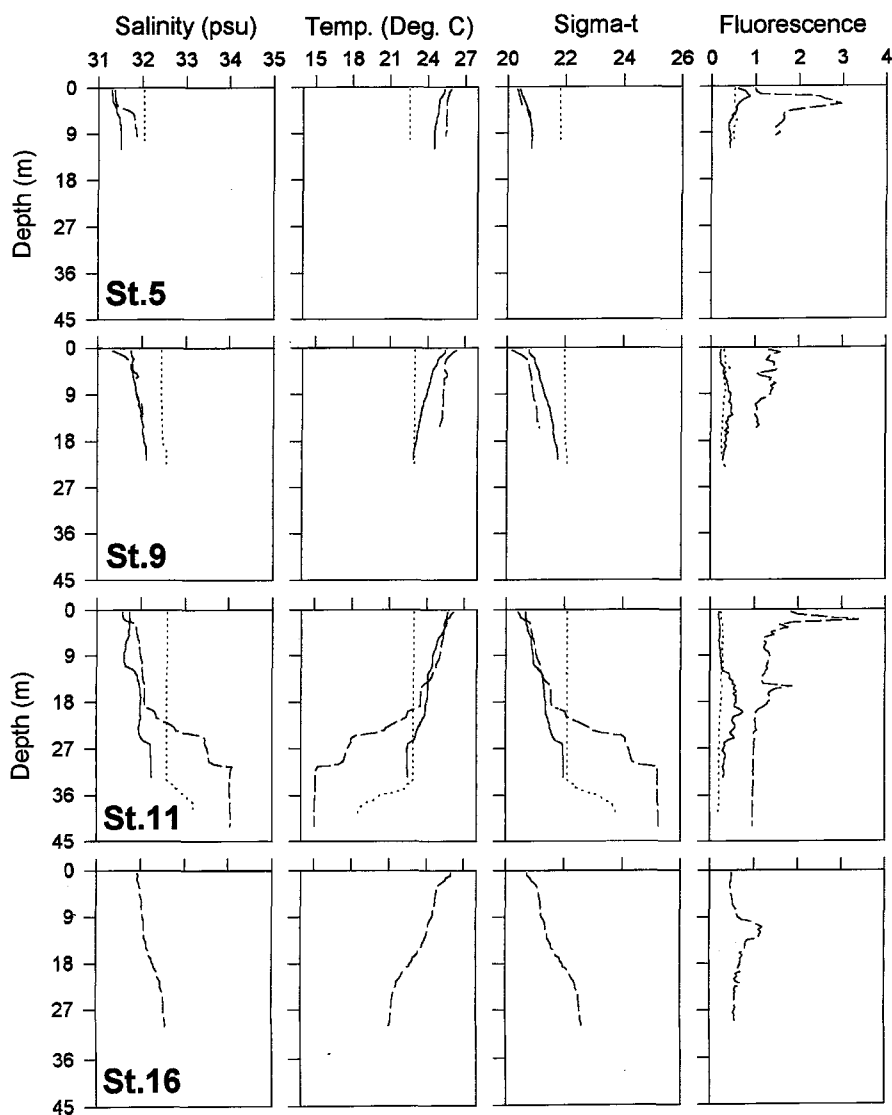


Fig. 5. Vertical profiles of hydrographical properties and fluorescence. —, 20, Jun.; - - -, 27, Aug.; ----, 22, Sep. (1997).

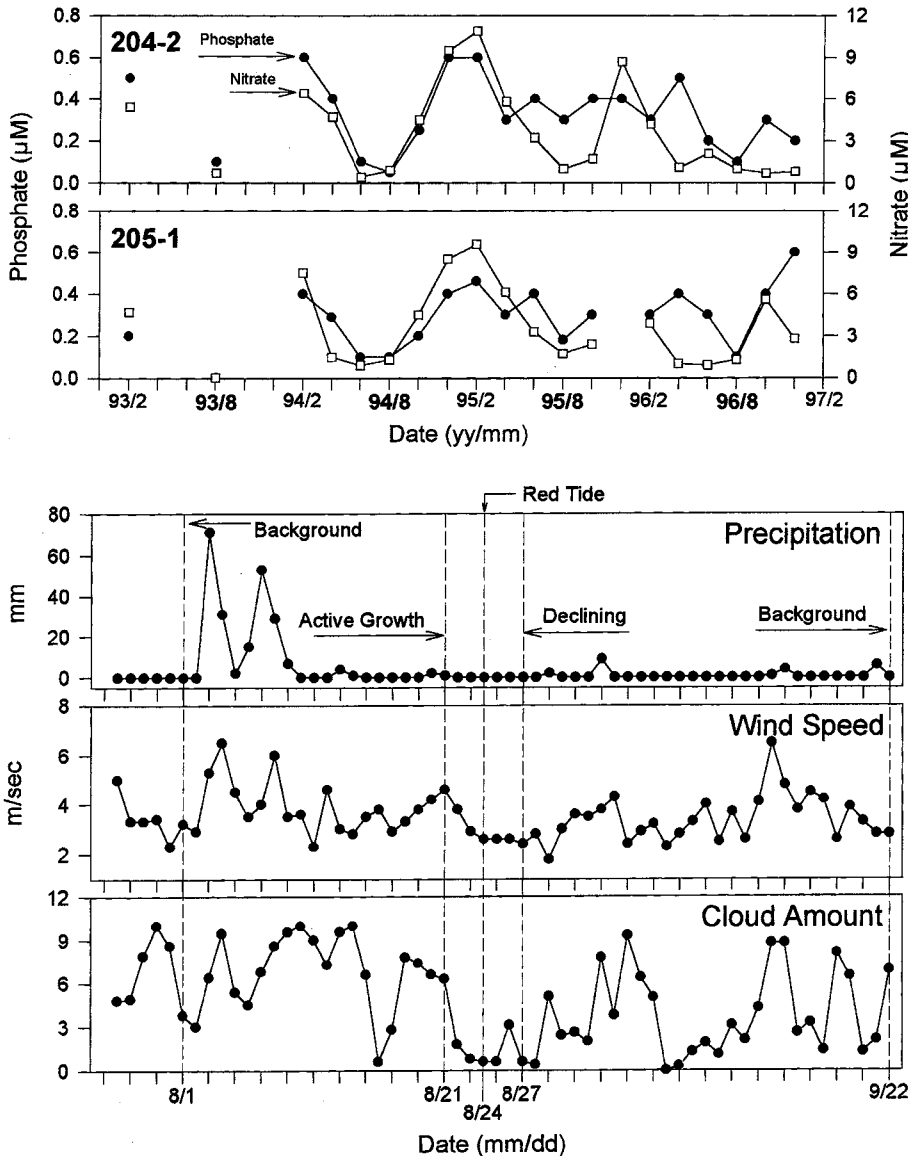
시 국지적인 기상조건에 의해 설명이 되지 않는다. 이 시기의 평균기온은 8월 21일과 8월 27일 사이의 평균기온에 비해 약 1°C 낮아진 반면에 표층에서 30 m 수심까지의 수온이 22~23°C 사이로 낮아지면서 수직적으로 균질화된 현상은 국지적인 기상조건에 의한 수온 변동의 결과로 볼 수 없다. 또한 기온이 낮아지면서 발생하는 표층 냉각효과로 인해 해수의 수직적인 대류가 일어나 수층의 수온이 균질화 되었다면, 염분의 분포에서도 이와 같은 현상이 나타나야 한다. 즉, 수층의 수온이 수직적으로 균질해질 경우 이 효과는 수층의 염분에도 동시에 나타나야 한다. 그러나 8월 27일에 표층에서 15 m 깊이까지의 염분이 32 psu 이하인데 비해 9월 22일에는 동일 수층의 염분이 32.5 psu 이상으로 고염화된 사실은 단순한 수층의 수직적인 혼합 효과로는 설명할 수 없다. 이와 같은 점을 고려하면 9월 22일 관측된 해수 특성변화 역시 국지적인 기상조건에 의한 변화보다는 외해수의 유입에 의한 것으로 해석된다.

적조 발생 직전인 8월 21일과 적조가 소멸된 9월 22일의 염

분변화 원인을 살펴본 결과 이와 같은 염분변화가 국지적인 강수나 담수의 유입보다는 주위 외해에서 해수가 유입되어 발생할 것으로 해석되었으며, 이 시기에 수층구조의 변화 역시 급격하게 나타나고 있다. 이와 같은 사실로부터 연구해역의 염분특성 및 수층구조의 변화는 주위 외해역의 해수운동 특성과 관련이 있다고 사료된다. 또한 8월 1일에 비해 특성이 전혀 다른 고온 저염수가 유입되었던 시기인 8월 21일에 적조생물이 처음 출현한 것과 8월 27일에 비해 특성이 다른 해수가 유입된 9월 22일에 적조가 소멸된 것은 연구해역에서 적조의 발생과 소멸이 외해역에서 유입되는 해수의 특성과 관련성이 깊다고 생각된다.

**해양화학적인 해석: 용존무기질소의 공급원**

**남해안의 영양염의 일반적인 변화경향(1993~1996):** 1993년에서 1996년까지 국립수산진흥원의 정선 해양관측 자료중 본 연구해역과 인접한 수역의 질산염과 인산염의 계절적인 변화추이를 나타낸 것이 Fig. 6이다(국립수산진흥원, 1993; 1994; 1995;



**Fig. 6.** General variations of nitrate and phosphate in the South Sea of Korea. Data from NFRDI (1993, 1994, 1995, 1996).

**Fig. 7.** Variations of meteorological data in the Kohung area.

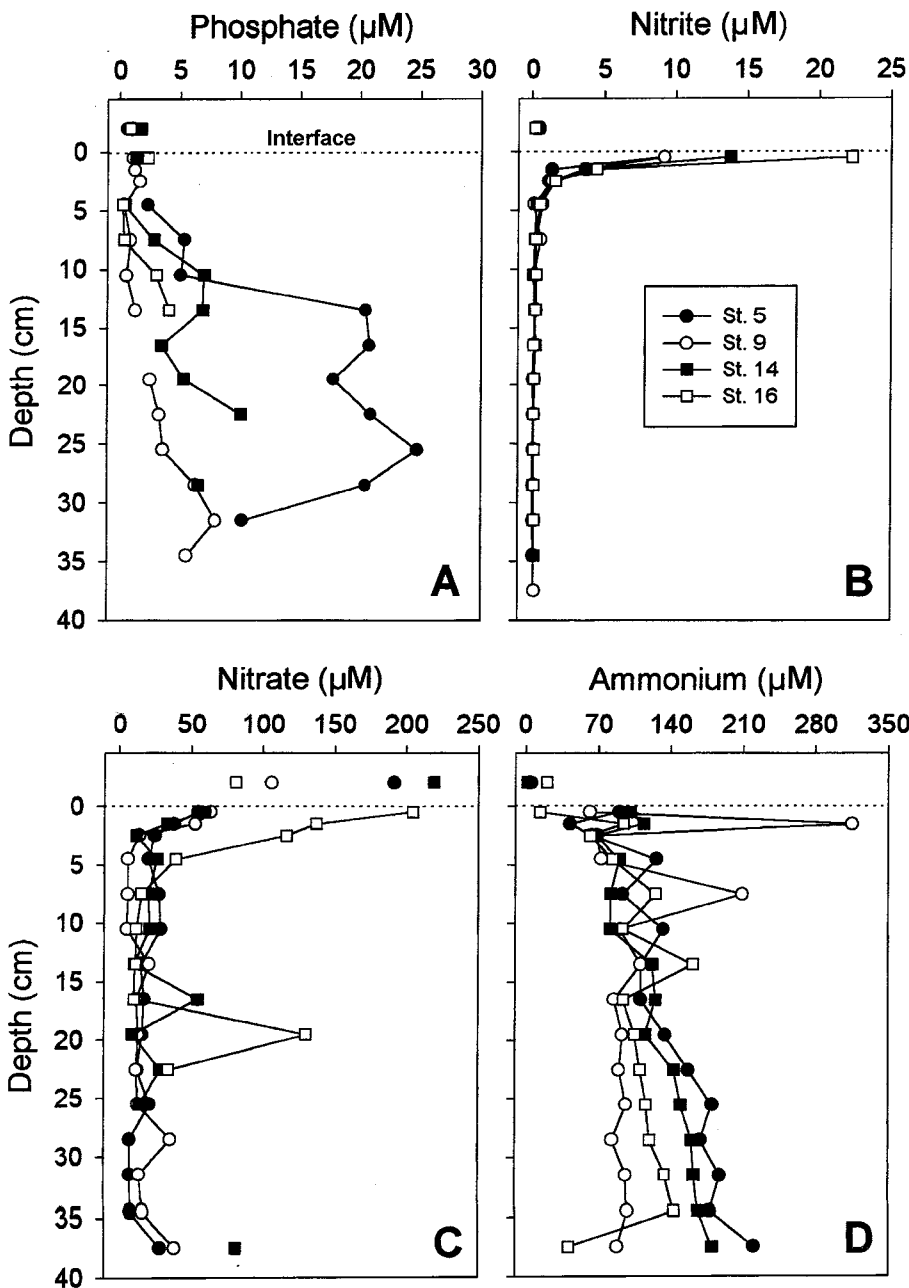
1996). 여기에서 연중 영양염의 농도가 가장 높은 기간은 2월이며, 점차 감소하여 가장 낮은 기간은 8월임을 알 수 있다. 8월 중 질산염의 농도는  $1\ \mu\text{M}$  이하이며, 인산염의 경우  $0.1\ \mu\text{M}$ 로 나타났다. 이후 10월에는 전 수층의 수직적인 혼합이 활발해짐에 따라 점차 영양염의 농도는 증가하게 된다. 따라서 본 연구 기간 중 나타난 용존무기질소의 농도는 이례적으로 높은 것이다.

**인근 육상의 영양염 공급원:** 연구기간 중 강우량, 풍속, 구름량에 대한 자료는 Fig. 7에 도시하였다. 8월 3일에서 8일까지 총  $212.5\ \text{mm}$ 의 집중호우가 있었으며, 이때 풍속과 구름량도 비교적 많았다. 이후 특이한 집중강우 현상은 기록되지 않았다. 북측의 표층역에 3차 조사(8월 1일)와는 달리 4차 조사시에  $31.5\ \text{psu}$  이하의 저염수가 북측정점(5, 6, 7, 8,과 9)의 표층역에 나타난 현상

**Table 3.** Annual fluxes of DIN into the Kohung area ( $10^6\ \text{moles} \cdot \text{yr}^{-1}$ )

Sources		Annual flux of DIN
Benthic	Inner Bay	0.05
	Outer Bay	0.04
Haechang Dike		8.4
Yoja Bay+Suncheon Bay		20
Offshore		2900

(Fig. 3)은 8월 3일과 8월 8일 사이에 일어난 집중강우의 영향으로 연구해역 서측과 북측에 각각 위치한 해창방조제와 여자만으로 부터 유입된 저염수의 영향으로 해석된다. 그러나 이러한 저염분층의 출현은 연구해역의 북측에 한정된 것으로 확인되었다.



**Fig. 8.** Nutrient results from the Kohung overlying water and interstitial water (20, June, 1997). A. Phosphate, B. Nitrite, C. Nitrate and D. Ammonium.



연구기간 동안 얻어진 자료에서 용존무기질소의 농도는 적조 생물의 폭발적인 증식시기와 함께 감소한 반면 용존무기질소는 큰 영향을 받지 않았다(Fig. 4). 정점 5와 9는 연구해역의 북쪽 내만 해역에 해당하고, 정점 16은 외해역이며, 정점 11는 점이적인 성격을 가진 해역에 해당한다. 연구해역 전체에서 8월 1일까지의 적조발생 이전에 용존무기질소가 남해안의 일반적인 용존무기질소농도에 비하여 높았고, 적조생물이 폭발적으로 증식한 시기 이후 농도가 감소하였다. 적조가 소멸된 후 용존무기질소도 정상적인 상태로 환원되었다. 하절기 집중강우는 영양염의 공급과 관련하여 적조의 유발요인이 된다. 따라서 연구해역에서 용존무기질소의 가능한 공급원을 연구하는 것은 가장 중요한 적조유발요인을 파악하는데 도움을 줄 것이다. 연구해역을 정점 5와 9로 구성되는 북측 내만해역과 그 외의 해역으로 구분하여 계산한 공급된 용존무기질소의 수치는 Table 3과 같다. 연구해역으로 유입되는 용존무기질소의 공급원별 수치는 다음과 같다.

첫째, 1997년 강우가 해수표면으로 직접 유입하는 것과 연구지역의 북쪽에 위치한 담수호인 해창방조제로부터 방출, 그리고 여자만에서 유입하는 연안해수로 볼 수 있다. 유입된 용존무기질소의 총량을 알기 위해 해창방조제의 연간 담수배출량인  $7.3 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ (유, 1995)에, 실측한 담수의 평균 농도  $114 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ 를 곱하여 1997년 연구해역으로 유입된 용존무기질소의 총 수치를 추정하면  $8.35 \times 10^6 \text{ moles} \cdot \text{y}^{-1}$ 에 이른다. 여기에 더하여 인근 지천을 통하여 순천만과 여자만에서 유입하는 용존무기질소의 농도는  $4.23 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ , 유입량은  $4768 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ (한국해양연구소, 1990)이므로 총 유입 수치는  $20 \times 10^6$

$\text{moles} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. 따라서 연구해역의 북측으로 유입한 총 수치는  $28.4 \times 10^6 \text{ moles} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다.

둘째, 퇴적물로부터의 공급을 들 수 있다. 1997년 하절기에 시추한 퇴적물의 정점별 영양염의 수직분포가 Fig. 8에 있다. 수지(F<sub>i</sub>)는 Fick의 제1법칙을 응용하여 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다(Lerman and Brunskill, 1971; Ciceri *et al.*, 1992).

$$F_i = (C_{pw} - C_{sw}) \cdot D_0 \cdot \Delta x^{-1} \cdot F^{-1} \cdot \Phi^{-1}$$

C<sub>pw</sub>는 퇴적물의 표층 3 cm에서 추출된 공극수에서의 이온 농도, C<sub>sw</sub>는 상층수(퇴적물 표층에서 3 cm)에서의 이온 농도, D<sub>0</sub>는 온도에 따라 보정된 확산계수(Li and Gregory, 1974), Δx는 확산이 발생하는 퇴적물의 두께(3 cm), F는 Resistivity formation factor(Ullman and Aller, 1982), Φ는 퇴적물 표층 1 cm의 공극율을 나타낸다. 이에 의하여 추산한 연구지역에서 퇴적물로부터 상층수로 공급되는 용존무기질소의 총 수치는 내만에서는  $0.05 \times 10^6 \text{ moles} \cdot \text{y}^{-1}$ , 그 외 해역에서는  $0.04 \times 10^6 \text{ moles} \cdot \text{y}^{-1}$  이른다.

셋째, 외해수로부터의 공급을 들 수 있다. 외해수의 연평균 용존무기질소농도는  $2.59 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ 이고, 연구지역에서의 순유속(net current speed)은 0.1 knot이다(수로국, 1981). 이 속도로 표·저층으로 모두 공급된다고 가정하면 공급된 용존무기질소의 총 수치는  $2900 \times 10^6 \text{ moles} \cdot \text{y}^{-1}$ 에 이른다.

이상의 자료로부터 연구해역의 북측 내만해역의 한정된 지역만을 고려하면, 해창방조제, 순천만과 여자만에서 공급된 용존무기질소의 양이 유입 수치의 70%를 차지하여 주 공급원이 되는

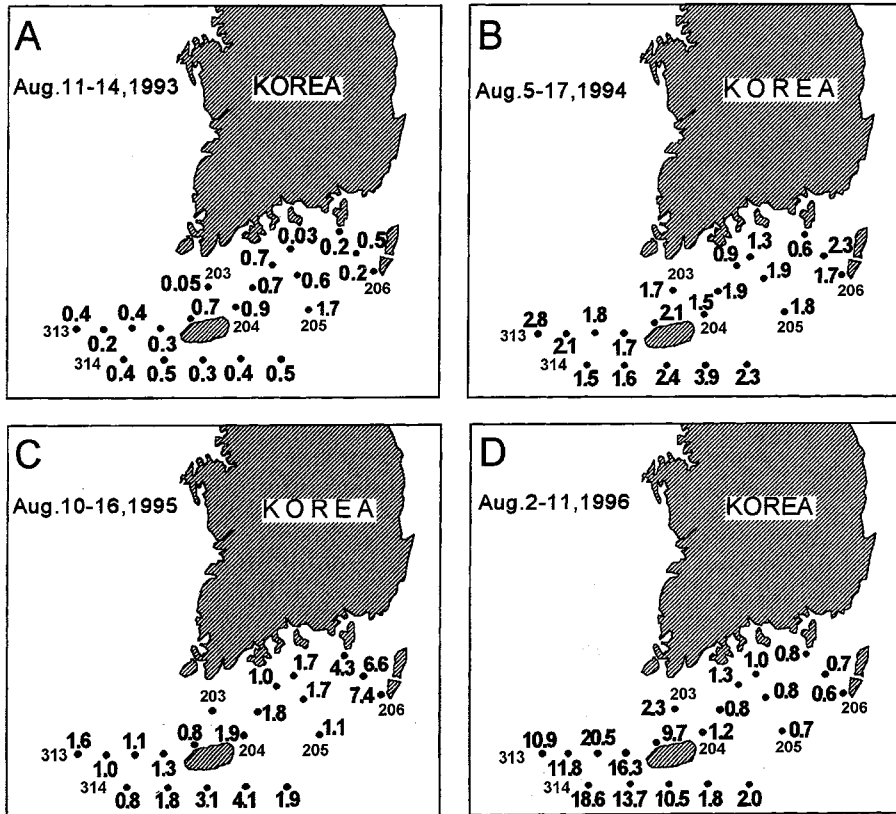


Fig. 9. Horizontal distributions of surface nitrate ( $\mu\text{M}$ ) in August from 1993 to 1996. Data from NFRDI (1993-1996).

것으로 생각된다. 그러나 그 외의 해역에서는 외해로부터 유입된 수지가 전체 유입량의 98%가 되어 주 유입원이 된다. 연구기간 전체로 볼 때 용존무기질소의 주 공급원은 외해로 보는 것이 타당하다. 영양염의 외해 공급원으로 양자강 배출수의 가능성을 검토하였다.

1993년부터 1996년까지 8월중 연구한 국립수산진흥원 자료로부터 매우 흥미로운 사실을 발견하였다. 영양염 자료를 정리하면 만에 인접한 고정점인 204와 205선의 정점 1과 2에서 나타난 표층수 질산염의 농도는 0.4~0.9  $\mu\text{M}$ 로서 204와 206선의 정점 3~6에 이르는 외해정점들에서 나타난 1.5~2.3  $\mu\text{M}$ 에 비하면 영양염 농도가 낮게 나타나고 있다. 이러한 현상은 1996년에 극명하게 나타난다. 204선이 0.7~1.0  $\mu\text{M}$ 의 농도분포를 보이는데 비하여 제주도 서측에 10.5~20.5  $\mu\text{M}$ 에 이르는 매우 높은 농도의 질산염이 표층수에 출현한다(Fig. 9). 이러한 현상은 여름철 양자강에서 유출된 담수에 함유된 높은 영양염이 식물플랑크톤에 의하여 채 소모되지 못한 상태로 이 해역까지 확장된 결과로 생각된다. 최근에 발표된 Wong *et al.*(1998)에 의하면 양자강 유출수에는 4  $\mu\text{M}$ 정도 과잉의 질산염이 함유되어 있으므로 높은 N/P 비를 가지며, 이 유출수는 여름철 동지나해 표면적의 50%에 이르는 광대한 면적에 수심 약 15 m 정도까지 확장한다고 보고하였다. 이러한 결과와 함께 여름철 저염분의 표층수가 남해안에 출현한다는 자료(국립수산진흥원, 1993; 1994; 1995; 1996)는 흔히 찾을 수 있다. 조 등(1995)이 제시한 저염표층수의 확장속도는 10~15  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 달한다고 한다. 따라서 6월말 내지 7월초에 발생하는 여름철 장마시기에 양자강 하구를 통해 배출된 담수는 약 1개월 후인 8월초 이후에 고흥지역에 도달할 수 있을 것으로 추정할 수 있다. 고흥해역에 유입되는 용존무기질소는 주로 외해역에서 조사해역으로 간헐적으로 유입되는 외해수의 출현에 의해서 공급되며, 적조의 발생 및 소멸과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

## 참고문헌

국립수산진흥원, 1993. 해양조사연보. **42**: 448 pp.  
 국립수산진흥원, 1994. 해양조사연보. **43**: 510 pp.  
 국립수산진흥원, 1995. 해양조사연보. **44**: 519 pp.  
 국립수산진흥원, 1996. 해양조사연보. **45**: 527 pp.  
 국립수산진흥원, 1997. 한국 연안의 적조. 280 pp.  
 김상우, 조규대, 노홍길, 이재철, 김상현, 신상일, 1995. 1992-93년 하계 득량만의 수온과 염분의 분포. 한국수산학회지, **28**: 7-14.  
 수로국, 1981. 조류도(여수에서 완도). NO. 1421. 18 pp.  
 양동범, 김은수, 이광우, 1983. 진해만의 적조와 수질환경. 한국해양연구소보, **5**: 15-20.  
 유명숙, 1995. 해창만 배수갑문 시설에 따른 어업권 피해 감정조사 보고서. 부경대학교, 203 pp.  
 이준백, 유광일, 1990. 마산만의 와면모조류 군집의 동태와 계절적 천이. 한국해양학회지, **25**: 106-116.  
 이진환, 광희상, 1986. 진해만의 *Gymnodinium nagasakiense* 적조에 관한 연구. 한국생태학회지, **9**: 149-160.  
 이진환, 한명수, 허형택, 1981. 진해만의 적조원인생물에 관한 연

구. 한국해양연구소보, **3**: 97-105.  
 이진환, 허형택, 1983. 득량만에 있어서 식물플랑크톤과 적조발생에 관한 연구. 한국해양연구소보, **5**: 21-26.  
 정규진, 신석우, 1996. 여수연안 및 동중국해의 세균상: 1. 일반세균, *Vibrio* spp., 대장균군 군수에 따른 수평분포. 한국수산학회지, **29**: 9-16.  
 정해진, 박종규, 최현용, 양제삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 조경제, 김형섭, 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 2. 1997년도 플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지, **5**: 27-36.  
 조양기, 김 구, 노홍길, 1995. 여름철 남해의 재염화 취송류. 한국해양학회지, **7**: 126-134.  
 추효상, 이규형, 윤양호, 1997. 거금수로 해역의 수온과 염분의 변동. 한국수산학회지, **30**: 252-263.  
 한국해양연구소, 1990. 순천만 어장(양식물) 피해원인 조사 연구. BSPI 00096-293-3, 474 pp.  
 해양수산부, 1999. 적조피해대책연구. 527 pp.  
 Borkman, D.G., R.W. Pierce and J.T. Turner, 1993. Dinoflagellate blooms in Buzzards Bay, Massachusetts. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, edited by Smayda, T.J. and Y. Shimizu, Elsevier, New York, pp. 211-216.  
 Chang, H.M., 1990. Studies on the phytoplankton and nutrients in the Yeosu Haeman. *Bull. Korea Fish. Soc.*, **22**: 408-414.  
 Ciceri, G., S. Maran, W. Martinotti and G. Queirazza, 1992. Geochemical cycling of heavy metals in marine coastal area: benthic flux determination from porewater profiles and *in situ* measurements using benthic chambers. In: Sediment/Water Interactions, edited by Hart, B.T. and P.G. Sly, Kluwer Academic Publishers, London, pp. 501-517.  
 Dahl E. and K. Tangen, 1993. 25 years experience with *Gyrodinium aureolum* in Norwegian waters. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, edited by Smayda, T.J. and Y. Shimizu, Elsevier, New York, pp. 15-21.  
 Doucette, G.J. and P.J. Harrison, 1990. Some effects of iron and nitrogen stress on the red tide dinoflagellate *Gymnodinium sanguineum*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **62**: 293-306.  
 Figueiras F.G. and A.F. Rios, 1993. Phytoplankton succession, red tides and the hydrographic regime in the Rias Bajas of Galicia. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, edited by Smayda, T.J. and Y. Shimizu, Elsevier, New York, pp. 239-244.  
 Lerman, A. and G.J. Brunskill, 1971. Migration of major constituents from lake sediments into lake water and its bearing on lake water composition. *Limnol. Oceanogr.*, **16**: 880-890.  
 Li, Y.H. and S. Gregory, 1974. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **38**: 703-714.  
 Matsunaga, K., K. Igarashi, S. Fukase and H. Tsubota, 1984. Behavior of organically-bound iron in seawater of estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **18**: 615-622.  
 Mihnea, P.E., 1993. Blooms of *chrysophyta* in the Black Sea. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, edited by Smayda, T.J. and Y. Shimizu, Elsevier, New York, pp. 293-297.  
 Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.  
 Pitcher, G.C., D.A. Horstman and D. Calder, 1993. Formation and

- Decay of red tide blooms in the Southern Benguela Upwelling System during the summer of 1990/1991. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, edited by Smayda, T.J. and Y. Shimizu, Elsevier, New York, pp. 317–322.
- Solorzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.*, **14**: 799–801.
- Ullman, W.J. and R.C. Aller, 1982. Diffusion coefficients in near-shore marine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **27**: 552–556.
- Wong, G.T.F., G-C. Gong, K-K. Liu, and S-C. Pai, 1998. 'Excess nitrate' in the East China Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **46**: 411–418.
- Sharples, J., 1997. Cross-shelf intrusion of subtropical water into the coastal zone of northeast New Zealand. *Cont. Shelf Res.*, **17**: 835–857.
- Steidinger, K.A., G.A. Vargo, P.A. Tester, and C.R. Tomas, 1998. Bloom dynamics and physiology of *Gymnodinium breve* with emphasis on the Gulf of Mexico. In: Physiological Ecology of Harmful Algal Bloom, NATO ASI series Vol. G 41, edited by Anderson, D.M., A.D. Cembetla and G.M. Hallegraeff. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 133–153.
- Yang, D-B. and G-H. Hong, 1982. Nutrients and chlorophyll-*a* variations at a fixed station during the red tides in the Jinhae Bay. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **17**: 19–26.

---

1999년 2월 26일 원고 접수

1999년 10월 12일 수정본 채택