

한국 남해 나로도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계

최 현 용*
군산대학교 해양정보과학과

Oceanographic Condition of the Coastal Area between Narodo Is. and Sorido Is. in the Southern Sea of Korea and Its Relation to the Disappearance of Red-Tide Observed in Summer 1998

HYUN-YONG CHOI*
Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea

Cochlodinium polykrikoides 유해성적조 발생지역인 한국 남해 나로도 와 소리도 사이 해역의 물리적인 환경을 연구하기 위하여 1998년 5월 31일부터 9월 24일까지 7회에 걸쳐 수온 및 염분을 관측하였다. 연구해역의 표층에서 30 m 깊이까지의 수층에서는 관측 초기인 춘계부터 하계로 갈수록 수온이 증가하고 염분은 낮아지는 물성의 계절적인 변화가 뚜렷하였는데 수층전체의 평균수온은 총 조사기간동안 6°C 증가하고 평균염분은 2.71 psu 낮아졌다. 관측된 평균염분의 변화는 연구해역의 강수와 인접육지에 의해 공급될 수 있는 담수량만으로는 설명할 수 없었으며, 남해외해역으로부터 유입되는 저염수에 의해 일어났을 것으로 해석되었다. 이 해역에서 적조의 발생시기, 진행시기 및 적조가 사라진 시기에 염분의 공간적인 분포가 다른 특징을 보였으며, 특히 적조가 사라진 시기에는 염분이 직전 시기에 비해 크게 낮아지고 수층구조도 직전시기의 성층구조에서 혼합층구조로 변화하였는데, 이와 같은 변화는 남해 외해역으로부터 저염수의 유입으로만 설명할 수 있었다. 이로부터 물리적인 해수유동이 이 해역에서 적조가 사라진 주요한 원인의 하나로 제시되었다. 본 연구결과를 차후 남해 연안역의 적조현상을 이해하기 위해서는 인접 육지로부터 유입되는 환경적 요소들은 물론 대상해역을 포함한 남해 외해역의 해수순환특성, 그리고 해수순환에 의해 이송되는 해수의 물리, 화학 및 생물학적 요소를 종합적으로 연구해야 할 필요성을 시사한다.

Hydrographic surveys were carried out seven times during May 31, 1998 and September 24, 1998 in order to study the physical environments of the coastal area between Narodo Is. and Sorido Is. in the southern sea of Korea (the South Sea) where the occurrence of *Cochlodinium polykrikoides* red tide is frequently observed in summer. Temperature and salinity of the water column from the surface to the depth of 30 m exhibit large seasonal variations. Mean temperature of the water column increased by 6 and mean salinity of the water column decreased by 2.71 psu during the observation period. Both the freshwater supplied from the adjacent land and the precipitation over the study area cannot account for the observed salinity variations. The influx of the low salinity water from the offshore area is considered to be the main cause for the observed salinity changes. Surface salinity in the study area shows different spatial distribution in the period of outbreaking, mid-stage and disappearance of the red tide. Especially, salinity was abruptly lowered at the stage of disappearance of red tide as compared to salinity of the previous observation period. Vertical structure of water properties also became vertically homogeneous at the disappearance stage, while it was highly stratified in the previous observation. Such changes can only be explained by the inflow of low salinity water from the offshore, which is considered as the most possible cause for the disappearance of the red tide in the study area. This study suggests that exchanges of water, and chemical and biological factors between coastal areas and offshore area in the South Sea need to be studied in association with the general circulation of the South Sea in order for the better understanding of the occurrence and disappearance of the red tide in the coastal area of the South Sea.

*chy@kunsan.ac.kr

서 론

전남 고흥군 나로도도와 여천시 소리도 사이 해역은 북쪽으로는 여사만 및 가막만과, 동쪽으로는 금오도 및 소리도 등 섬 들 사이의 좁은 수로를 통해 여수해만과 연결되어 있고, 남쪽으로는 한국 남해 외해역과 연결된 반폐쇄성 해역이다. 해저지형은 북서쪽에서 남동쪽 방향으로 수심이 10 m에서 50 m까지 깊어지는 형상이며, 수심이 가장 깊은 소리도 인근 해역은 50 m 이상이다(Fig. 1). 이 해역 남쪽의 한국 남해외해역은 여름철에는 양자강희석수로 알려진 저염분수가 표층에서 약 20~30 m 깊이의 두께로 이 해역을 통과하고 다른 계절에는 고온·고염의 대마난류수계가 통과하기 때문에 해수물성의 연변화가 크게 나타나는 해역이다.

이 해역에서는 1995년 이후 매년 8월 중순 이후에 유해성 적조가 발생하고 있지만(국립수산진흥원, 1997) 아직까지 이 해역에서 발생하는 유해성 적조의 발생, 진행 및 소멸 등에 대한 기작은 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 연안역에서 발생하는 적조는 생물 및 화학적인 요소외에 적조발생해역의 해양물리적인 특성과도 밀접한 관련을 지닌 현상이다. Sharples *et al.*(1997)은 하계에 뉴질랜드 북부 해역에서 발생하는 적조가 동오스트레일리아 해류의 축이 연안으로 접근하면서 물성이 다른 외양역의 해수가 연안역으로 유입되는 시기에 발생한다고 했고, Steidinger *et al.*(1998)은 미국의 멕시코만 연안역에서 발생하는 적조가 Gulf-Loop 해류의 축이 연안으로 접근하여 외양수가 연안역으로 유입될 때 발생한다는 연구결과를 제시하였다. 이들의 연구는 비록 특정 해역의 적조현상에 국한된 결과이지만, 적조발생 해역의 해수유동이 연안역의 적조와 관련이 있음을 제시하는 결과이다.

나로도도와 소리도 사이 해역은 남해 연안역과 외해역의 경계부위에 위치하고 있어 이 해역 북쪽으로부터 인접한 육지의 영향을, 이 해역 남쪽으로부터는 남해 외해역의 영향을 모두 받을 수 있는 해역이다. 더구나 남해 외해역은 계절에 따라 서로 다른 물성의 해수가 통과하기 때문에 남해 외해역 해수의 화학적·생물학적 특성 역시 통과하는 해수의 특성에 따라 다를 것으로 예상된다. 그러나

이 해역에 대한 연구결과는 극히 드물며, 이 해역과 가까운 해역인 득량만(김 등, 1995)과 거금수로(추 등, 1997) 해역 등 인근 연안역에서 수행된 연구들도 인접한 육지의 환경이나 기상조건 등 극지적인 환경요소들이 연구대상해역의 해양환경에 미치는 영향을 중심으로 이루어졌다. 이 해역에 대한 연구로는 양 등(2000)이 있는데 이들은 1997년 하계에 나로도도와 소리도 사이 해역에서 조사된 해수물성자료 및 영양염류 자료를 분석하여 이 해역이 남해 외해역을 통과하는 해수의 영향을 크게 받는 것으로 해석하였다.

본 연구는 나로도도와 소리도 사이 해역에서 발생하는 유해성 적조에 대한 연구의 일환으로 수행된 해양물리학적 기초조사로서 1998년 5월 31일부터 9월 24일까지 약 4개월 동안 7회에 걸쳐 나로도도와 소리도 사이 해역에서 수온 및 염분을 조사하였다. 이 해역에서 '*Cochlodinium Polykrikoides*' 유해성적조는 조사기간중인 1998년 8월 30일에 처음 발생하여 9월 22일까지 존재하다가 9월 23일 이후 사라졌다(국립수산진흥원 1998년 적조속보 제 1호~27호, unpublished). 본 논문에서는 관측된 염분자료와 강수량 및 인접 육지로부터 공급가능한 담수량을 이용하여 이 해역에서 관측된 염분변화의 원인을 논의하고, 이 해역에서 적조가 사라진 시기를 전후하여 관측된 해황의 특징을 논의하고자 한다.

자 료

본 연구에서 이용한 해수물성자료는 전남 고흥군 나로도도와 전남 여천시 소리도 사이 해역의 23개 정점(Fig. 1)에서 SBE-19와 SBE-25 CTD(Sea-Bird사 제작)를 이용하여 1998년 5월 31일부터 9월 24일까지 7회에 걸쳐 관측된 자료이다(Table 1). 23개 정점 중에서 가장 북서쪽에 위치한 여사만 입구의 정점 1과 가장 남동쪽에 위치한 소리도 남서쪽의 정점 15사이의 거리는 약 34 km, 정점 1과 금오도 서쪽의 정점 5사이의 거리는 약 15 km이고 23개 정점의 조사해역 면적은 약 375 km²이다. Table 1에서 8월 31일은 연구해역의 외나로도 남쪽해역에서 적조가 발견된 시기이고, 9월 12일은 적조가 소리도 인근해역까지 확장된 시기, 그리고 9월 24일은 나로도도와 소리도 사이 해역에서 적조가 사라진 시기에 해당한다.

이 해역 염분의 변화를 해석하기 위해 고흥기상관측소에 관측한 1998년 5월에서 9월 사이의 강수량 및 일평균풍속과 여수기상관측소에서 관측한 증발량을 이용하였다(Fig. 2). 해수물성관측이 시작된 1998년 5월 31일부터 관측이 종료된 9월 24일 까지 고흥 지방에 내린 총 강수량은 778.5 mm이고, 총 강수량의 96.6%인 752 mm가 5월 31일부터 8월 19일 사이에 기록되었다. 5월 31일

Table 1. Observation date and instrument used.

Observation date	Instrument	Remarks
31 May, 1998	SBE-25	
20 June, 1998	SBE-25	
11 July, 1998	SBE-25	
19 August, 1998	SBE-25	
31 August, 1998	SBE-19	Initial stage of red tide
12 September, 1998	SBE-19	Eastward extension of red tide
24 September, 1998	SBE-19	Disappearance of red tide

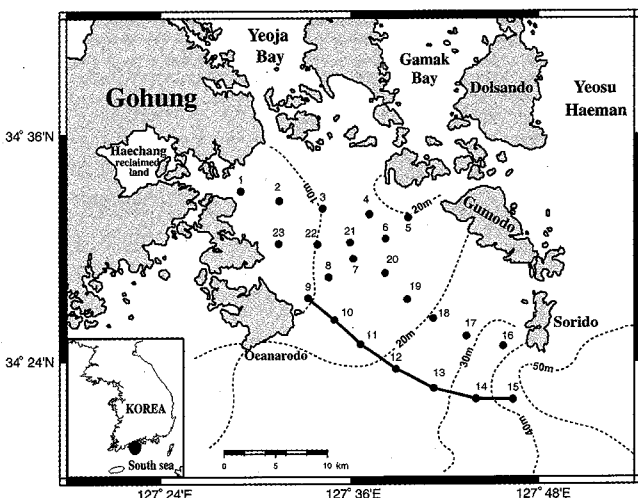


Fig. 1. Map showing the study area, bathymetry and 23 CTD stations. Dotted lines represent isobaths.

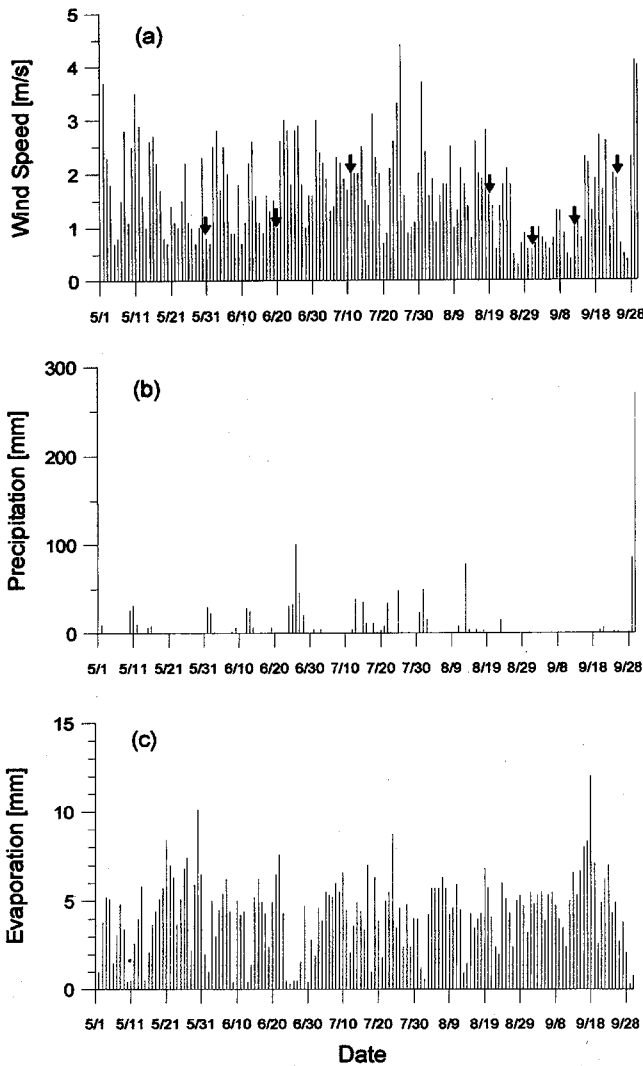


Fig. 2. (a) Daily mean wind speed at Gohung, (b) rainfall at Gohung and (c) evaporation at Yeosu from May to September, 1998. CTD observation dates are marked with bold arrows.

부터 9월 24일 사이에 기록된 여수지방의 증발량은 508 mm, 같은 기간동안 고흥 지방의 일평균 풍속은 최저 0.3 m/s, 최대 4.4 m/s를 기록하였으며 관측기간동안의 평균풍속은 1.67 m/s 였다.

그 외에 본 연구의 관측조사기간동안의 남해외해역 해황을 파악하기 위해 국립수산진흥원의 1998년 6월과 8월 정선관측 수온 및 염분자료를 이용하였다.

결과 및 토의

각 관측시기별 수온 및 염분 분포

표층수온 및 염분의 최저, 최고값과 저층수온 및 염분의 최저 및 최고값, 그리고 23개 정점의 표층과 저층에서의 평균수온 및 평균염분을 각 관측일별로 Table 2에 수록하였으며, 표층수온 및 표층염분분포는 Fig. 3a와 3b에, 저층수온 및 저층염분분포는 Fig. 4a와 4b에 관측일별로 도시하였다.

표층 평균수온은 5월 31일의 19.22°C부터 8월 19일의 26.29°C까지 증가한 후 9월 24일의 24.32°C로 낮아졌고, 표층 평균염분은 5월 31일의 33.05 psu부터 8월 19일의 30.98 psu까지 낮아진 후 8월 31일과 9월 12일에는 31.37 psu로 높아졌지만 9월 24일에는 총 7회의 관측치중 가장 낮은 30.42 psu로 급격히 낮아져서, 7회의 관측에서 나타난 표층 평균수온 및 표층 평균염분의 변화폭은 각각 7.07°C와 2.63 psu를 기록했다. 저층 평균수온의 최저치와 최고치는 각각 5월 31일의 17.78°C와 9월 24일의 22.98°C이고 저층 평균염분의 최고치와 최저치는 각각 5월 31일의 33.39 psu와 9월 24일의 31.08 psu로, 7회의 관측에서 나타난 저층수온 및 저층염분의 변화폭은 각각 5.2°C, 2.31 psu를 기록했다(Table 2).

표층수온 및 염분 분포

5월 31일, 7월 11일 및 8월 19일의 표층수온(Fig. 3a의 (a), (c), (d)) 및 표층염분(Fig. 3b의 (a), (c), (d))의 공간적인 분포는 전반적으로 연구해역의 북서쪽 정점들(정점 1, 2, 3, 22, 23)의 수온이 다른 정점들에 비해 상대적으로 높았고 표층염분은 다른 정점에 비해 상대적으로 낮은 특징을 보였다. 6월 20일(Fig. 3a의 (b), Fig. 3b의 (b))의 경우에도 이와 같은 특징이 나타나지만 이 시기에는 연구해역 남동쪽정점인 정점 14와 15에서도 저염수가 관측되었다. 그러나 9월 12일과 9월 24일의 표층수온 및 표층염분은 전혀 다른 분포를 보였다. 9월 12일(Fig. 3a의 (f), Fig. 3b의 (f))에는 정점 5와 정점 9 연장선상의 북쪽과 정점 9와 정점 18 연장선상의 남쪽에서 31.5 psu 이하의 저염수가 분리된 상태로 분포하였으며 최저염분은 연구해역의 남쪽 저염수 분포지역에서 관측되었고, 표층수온은 연구해역 남쪽 저염수 분포지역에서 다소 높게 나타났다. 표층평균염분이 31.0 psu 이하로 급격히 낮아진 9월 24일(Fig. 4a의 (g), Fig. 4b의 (g))에는 연구해역의 남쪽 정점들(정점 8-정점 14)의 염분이 가장 낮고 연구해역 북쪽으로 갈수록 오히려 염분이 높아졌으며, 표층수온 역시 표층염분이 낮은 정점 11, 12, 13, 14에서 상대적으로 높았다.

5월 31일부터 8월 19일 사이에 연구해역 북서쪽 정점들의 염분이 상대적으로 낮은 특징은 이 들 정점의 북측이나 서측에 위치한 해역으로부터 연구해역의 해수에 비해 염분이 낮은 해수가 유입되기 때문에 나타난 것으로 해석된다. 특히 이 기간에는 5월 31일부터 9월 24일까지의 총 강수량의 95%인 752 mm가 집중되었기 때문에 인접 육지로부터 유입되는 담수의 영향이 크게 나타날 수 있는 시기이다. 연구해역 북서쪽 정점들의 북쪽과 서측에는 연구해역으로 담수가 직접 유입되는 대형하천이 없기 때문에 이 정점들에서 관측된 저염수는 정점 1의 서쪽 약 7 km에 위치한 해창만간척지에서 배출되는 담수회석수 및 여자만으로부터 유입되는 담수회석수 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 6월 20일의 정점 14, 15에서 관측된 다른 정점에 비해 염분이 낮은 저염수 및 9월 12일의 외나로도 남동쪽의 저염수, 그리고 9월 24일에 관측된 연구해역 남쪽해역의 저염수는 조사 당일의 염분의 공간적인 분포형태로 볼 때 연구해역 남측 외해역에서 연구해역으로 유입되는 해수로 해석된다.

저층수온 및 염분분포

저층수온의 분포(Fig. 4a)는 시기에 따라 다르게 나타났다. 5월

Table 2. Ranges of temperature and salinity observed at surface and bottom of 23 stations for each observational period. T_m and S_m are the spatial average of temperature and salinity for 23 stations, respectively. S and B denote surface and bottom, respectively.

Date		Temperature (°C)			Salinity (psu)		
		Min.	Max.	T_m	Min.	Max.	S_m
May 31	S	18.35	20.49	19.22	32.44	34.04	33.05
	B	15.77	19.56	17.78	32.64	34.03	33.39
June 20	S	20.75	22.50	21.46	32.13	33.05	32.55
	B	17.39	21.34	20.08	32.29	33.93	33.09
July 11	S	22.69	24.79	23.89	31.38	32.27	31.80
	B	15.36	23.89	19.08	31.87	33.92	33.16
Aug. 19	S	25.03	27.01	26.29	30.27	31.61	30.98
	B	15.45	25.59	21.15	30.92	34.02	32.66
Aug. 31	S	24.48	25.46	25.01	30.74	31.88	31.37
	B	15.35	25.06	21.12	31.01	34.00	32.31
Sep. 12	S	24.00	26.94	25.61	31.19	31.60	31.37
	B	15.19	25.17	21.29	31.36	33.95	32.47
Sep. 24	S	24.05	24.62	24.32	30.20	30.77	30.42
	B	16.18	24.37	22.98	30.25	33.49	31.08

31일에는 수심이 10~15 m 사이인 연구해역 북서쪽 정점(정점 1, 2, 3, 22, 23)에서 저층수온이 19°C 이상이고 수심이 40 m 이상인 정점 14, 15, 16에서는 16°C 이하였지만, 6월 20일에는 19°C 이상의 수온이 수심이 30~40 m인 연구해역 남동쪽 정점 14, 17까지 분포하고 정점 15, 16에서도 17.5°C 이상의 수온이 관측되었다. 그러나 7월 11일에는 19°C 이상의 수온은 정점 10과 정점 20의 연장선 북쪽해역에서 분포하고 수심이 상대적으로 깊은 정점 14, 15, 16, 17의 수온은 16°C 이하, 수심이 상대적으로 얕은 북서쪽 정점들(정점 1, 2, 3, 22, 23)에서는 24°C 이상을 기록했다. 8월 19일과 8월 31일에는 정점 1, 2, 3, 22, 23을 중심으로 24°C 이상, 정점 14, 15, 16, 17을 중심으로 16°C 이하의 수온이 관측되었지만 9월 12일에는 24°C 등온선이 정점 9와 10사이까지 확장되었으며, 9월 24일에는 정점 11과 12사이까지 확장되었고, 정점 14, 15, 16, 17에서도 저층수온이 16.5~20°C까지 증가하였다.

저층염분도 시기에 따라 분포형태가 크게 달라지고 있다(Fig. 4b). 5월 31일에는 33.0 psu 이하의 저염수는 정점 1, 2, 3, 22, 23을 중심으로, 33.5 psu 이상의 고염수는 정점 11과 정점 20 연장선의 남동쪽 정점에서 관측되었지만, 6월 20일에는 23개 정점에서 전체적으로 염분이 낮아져 33.5 psu 이상의 고염수는 정점 15와 16에서만 관측되었다. 그러나 7월 11일에는 33.5 psu 이상의 고염수가 정점 10과 정점 19 남측의 정점들에서 관측되었으며 8월 19일, 31일, 그리고 9월 12일에는 수심이 깊은 정점 14, 15, 16, 17에서 관측되었다. 그러나 9월 24일에는 모든 정점에서 염분이 급격히 낮아졌으며, 저층염분이 북서쪽에서 남동쪽방향으로 증가한 다른 시기와는 달리 수심이 25 m보다 얕은 정점들에서는 남서쪽에서 북동쪽방향으로 염분이 증가하고 수심이 30 m보다 깊은 해역에서는 염분이 북서쪽에서 남동쪽으로 증가하는 특징을 보였다.

총 7회의 저층수온 및 저층염분분포에서 나타난 특징은 다음과 같다. 각 관측시기마다 저층수온 및 염분은 북서쪽에 위치한 정점들의 수온이 높고 염분이 낮으며 남동쪽 정점으로 갈수록 수온은

낮고 염분은 높은 공간적인 분포 특징을 보이고 있다. 이와 같은 공간적인 분포 특징은 북서쪽에서 남동쪽으로 수심이 깊어지는 연구해역의 해저지형과 연구해역의 서쪽과 북쪽에 위치한 해창만간 척지와 여자만으로부터 연구해역으로 유입되는 저염수의 영향 등이 복합적으로 작용하여 나타난 것으로 해석된다. 그러나 시기적으로는 수심이 30 m 이하인 정점들의 저층에서도 관측후반부로 갈수록 관측초기인 5월 31일에 비해 수온은 높아지고 염분은 낮아지는 계절변화가 뚜렷하게 나타나며, 특히 6월 20일과 9월 24일에는 수심이 40 m 이상인 정점들을 포함한 모든 정점의 저층에서 수온 및 염분의 급격한 변화가 관측되었다(Table 2, Fig. 3a, 3b, 4a, 4b참조). 직전 관측시기에 비해 저층수온은 증가하고 동시에 저층염분은 낮아지는 특징을 보이는 6월 20일과 9월 24일의 해수물성자료는 이 시기에 연구해역의 해황 변동이 크게 일어났을 가능성을 제시한다.

연구해역 전체수층의 평균수온 및 평균염분

Fig. 5는 수심이 20 m 이하인 정점 3과 정점 19, 그리고 수심이 40 m 이상인 정점 15의 수온 및 염분을 이용하여 구성된 정점별 수층의 수온 및 염분구조이다. 수심이 20 m 이하인 정점 3과 정점 19에서는 수온 및 염분의 변화가 표층에서 저층까지의 전 수층에서 나타났으며, 수심이 40 m 이상인 정점 15에서도 6월 20일과 9월 24일에는 수온 및 염분의 변화가 저층에서도 뚜렷하게 나타났다. 그러나 이 두 시기를 제외한 다른 시기에는 정점 15의 저층(30~35 m 이심)에는 수온은 16°C 이하, 염분은 33.8 psu 이상인 해수가 분포하고 있어 상층에 비해 해수물성의 변화가 크지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 6는 관측기간동안 수온 및 염분의 변화가 뚜렷하게 나타나는 표층에서 30 m 깊이까지 수층의 23개 정점 평균수온 및 평균염분(이하 각각 수층 평균수온 및 수층 평균염분으로 표기)을 각 관측일별로 도시한 것이다. 여기서 수층 평균수온 및 수층 평균염

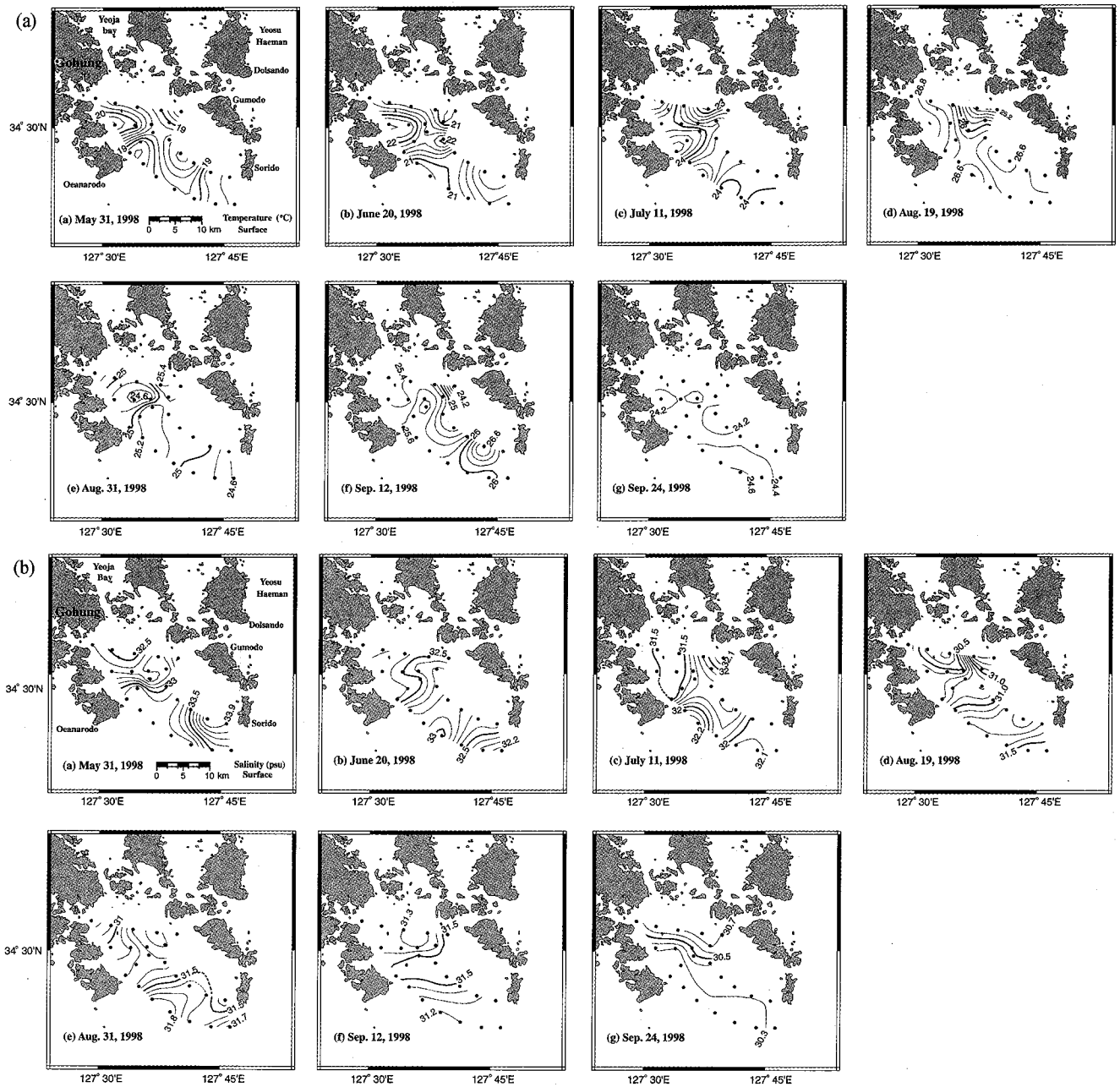


Fig. 3. (a) Surface temperature distribution and (b) Surface salinity distribution for each observation period. Contour intervals are 0.2°C for temperature and 0.1 psu for salinity, respectively.

분은 수심이 30 m 이하인 정점에서는 표층에서 저층까지, 30 m 이상인 정점에서는 표층에서 30 m 깊이까지의 수온과 염분을 평균한 값이고, 이 해수들의 총 체적량은 23개 정점 평균 17 m 깊이하까지의 총 체적량과 동일하다.

수층 평균수온은 5월 31일의 18.1°C 부터 증가하여 8월 19일에 23.8°C 가 되고, 그 이후에는 9월 12일의 23.2°C 까지 약간 감소하다 다시 9월 24일에는 7회의 관측치중 최대인 약 24.1°C 로 증가했다. 수온증가율로 보면 5월 31일과 6월 20일 사이에 $0.125^{\circ}\text{C}/\text{일}$, 9월 12일과 9월 24일 사이에 $0.075^{\circ}\text{C}/\text{일}$, 7월 11일과 8월 19일 사

이에는 $0.061^{\circ}\text{C}/\text{일}$ 로 5월 31일과 6월 20일 사이, 9월 12일과 9월 24일 사이에 상대적으로 수온증가율이 높았다.

수층 평균염분은 5월 31일에 33.35 psu로 부터 감소하여 9월 25일에 30.64 psu로 최소치를 나타내어 총 관측기간 동안 약 2.71 psu가 감소하였다. 염분감소율로 보면 5월 31일과 6월 20일 사이에 0.0235 psu/일, 9월 12일과 9월 24일 사이에 약 0.1083 psu/일, 7월 11일과 8월 19일 사이에 0.0167 psu/일로 수온증가율이 높았던 5월 31일~6월 20일, 9월 12일~9월 24일에 다른 시기에 비해 염분감소율도 높은 특징을 보였다.

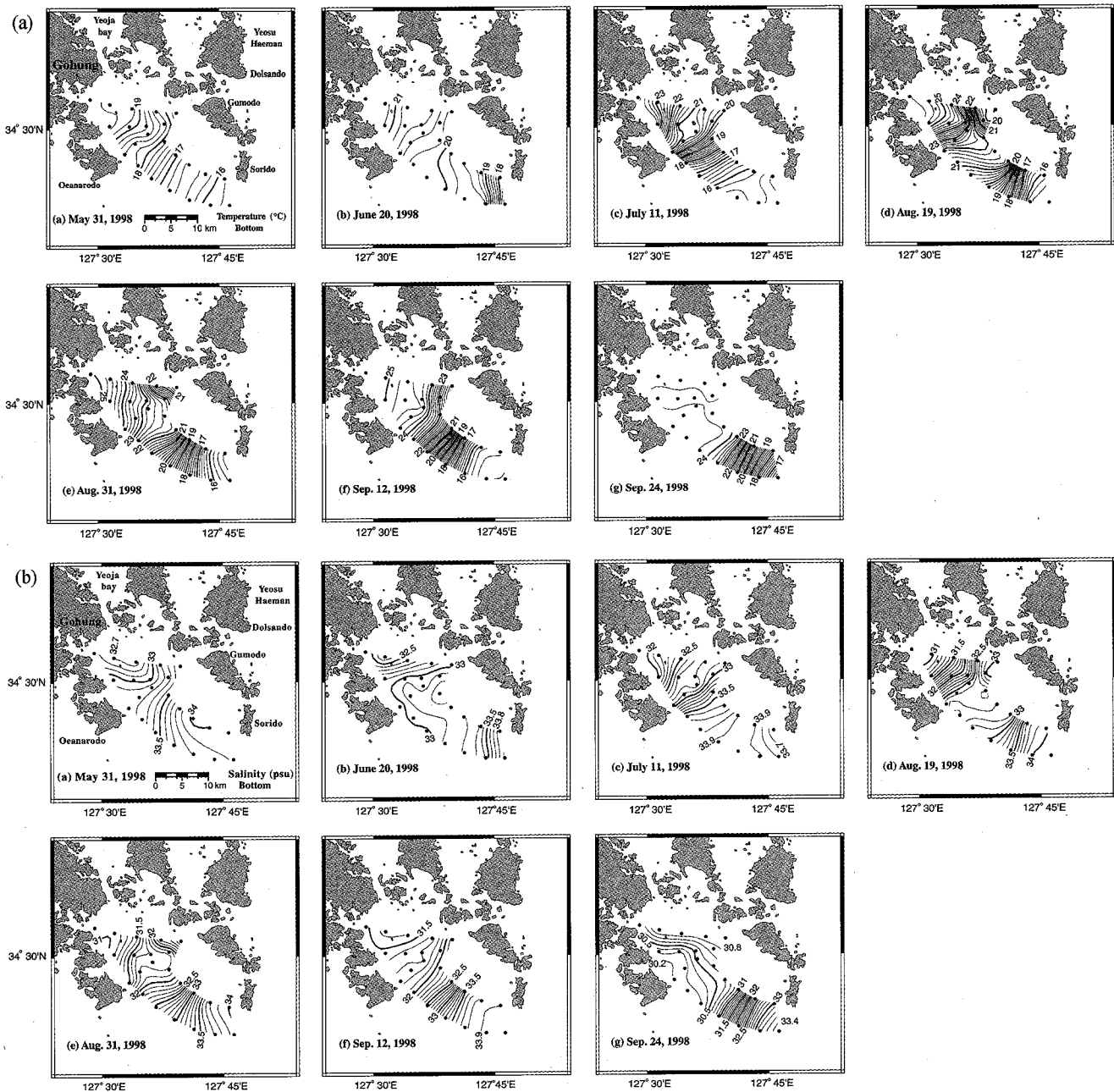


Fig. 4. (a) Bottom temperature distribution and (b) bottom salinity distribution for each observation period. Contour intervals are 0.2°C for temperature and 0.1 psu for salinity, respectively.

수층평균염분의 변화원인

Fig. 6에 도시한 23개 정점의 수층 평균수온의 변화는 해표면을 통한 대기와의 열 교환 및 이류나 확산 등에 의한 주위 해역과의 수평적인 해수교환에 의해, 수층 평균염분은 해표면을 통한 강수와 증발, 하천을 통한 담수의 공급 그리고 이류나 확산 등에 의해 연구해역의 해수보다 염분이 높거나 낮은 해수의 유입 등에 의해 일어난다. 연구해역의 표층 염분분포(Fig. 3b)에 의하면 이 해역은 북쪽에 위치한 육지와 연구해역 남쪽의 남해 외해역으로부터 저

염수가 유입될 수 있는 해역이다. 따라서 대기로부터의 열교환량 및 강수와 증발량, 그리고 북쪽 육지로부터 공급될 수 있는 담수량을 알면 이 둘 값과 연구해역의 수층 평균수온 및 수층 평균염분을 이용하여 관측된 수층 평균수온 및 염분의 변화의 원인이 대기나 연구해역 북쪽 육지에서 기인하는지, 아니면 남해 외해역에서 기인하는지를 파악할 수 있다. 수온의 경우 본 연구에서 조사한 7회의 관측자료만으로는 5월 31일부터 9월 24일사이의 대기와의 열교환량을 정확히 계산할 수 없었기 때문에, 여기서는 7회의 수층 평균염분과 총 관측기간동안의 연구해역의 강수량과 증발량,

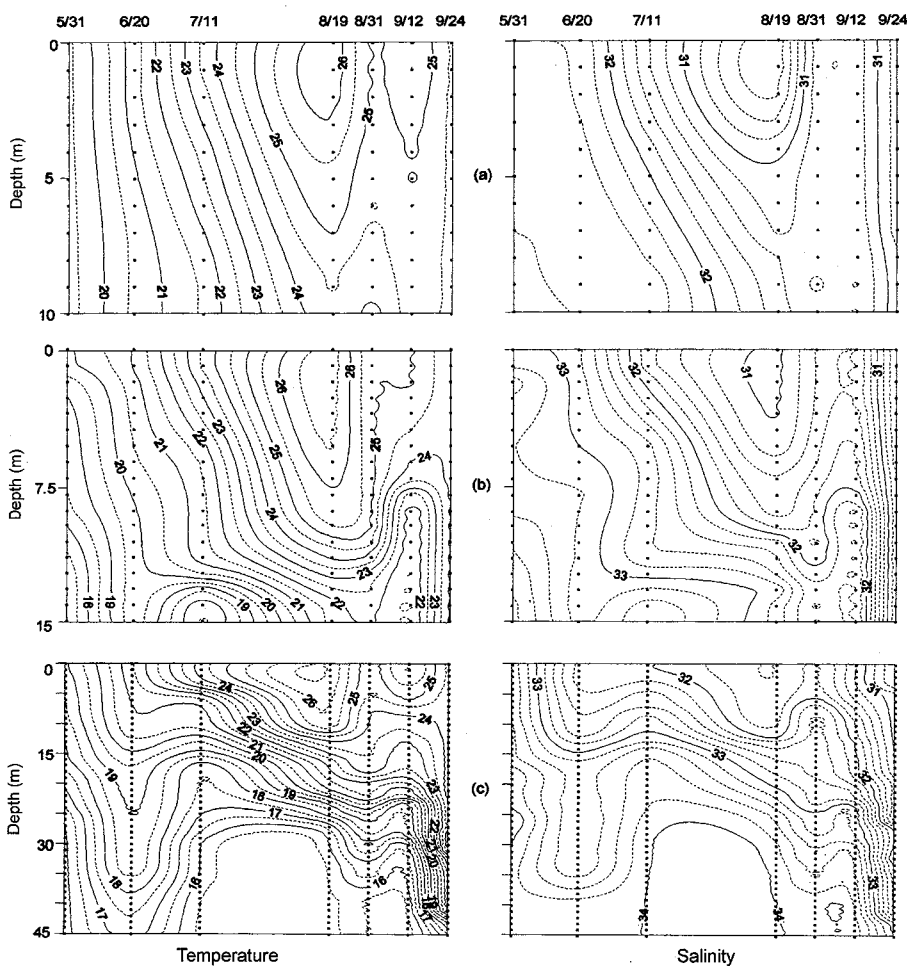


Fig. 5. Time-depth isopleths of temperature and salinity at (a) St. 3, (b) St. 19, and (c) St. 15. The units are °C for temperature and psu for salinity, respectively.

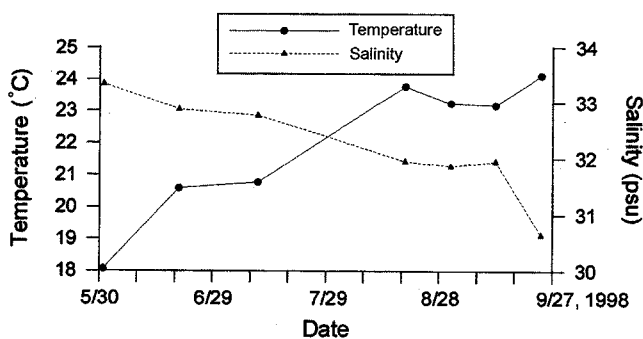


Fig. 6. Spatially averaged temperature and salinity of the upper 30 m layer for total stations.

그리고 인접육지로부터 유입될 수 있는 최대 담수공급량을 이용하여 연구해역 수층 평균염분의 변화원인을 고찰하였다.

연구해역의 강수 및 인접 육지로부터 공급 가능한 담수량과 수층평균염분

연구해역의 강수량 및 증발량으로 각각 고흥지방의 강수량과 여수지방의 증발량을 이용하였으며, 인접 육지로부터 공급되는 담수는 연구해역 북서쪽 정점들에서 상대적으로 염분이 낮게 나타

나는 표층염분분포(Fig. 3b)를 고려하여 Fig. 1에 도시한 정점 1의 서쪽 약 7 km에 위치한 해창만간척지에서 방출되는 담수와 정점 1의 북쪽에 위치한 여자만으로부터 유입되는 담수로 가정하였다. 해창만 간척지(최대 저수량 약 185만 m³)에서는 평시에는 수위관리 목적으로 필요에 따라 소량의 담수를 방출하고 집중강우시에만 저조시간대를 이용하여 다량의 담수를 방출하는데 그 양은 일평균 75만 m³를 넘지 못하며(여수대학교, 1995), 소규모 하천을 통해 여자만으로 유입되는 담수량은 100 mm 강수당 약 2400만 m³이다(한국해양연구소, 1990). 본 연구에서는 해수물성조사기간 동안 해창만 간척지에서 배출된 담수량 및 여자만으로 유입되는 담수량에 대한 자료를 확보할 수 없었기 때문에 이들 담수공급원으로부터 유입될 수 있는 최대 담수량을 적용하였다. 이를 위해 해창만간척지에서는 집중강우시의 최대배출량인 75만 m³/일이 매일 배출되어 이 담수가 23개 정점이 위치한 해역(조사해역면적 약 375 km²)의 염분을 낮추는데만 사용되는 것으로 가정하였고, 소하천을 통해 여자만으로 유입되는 담수량은 100 mm 강수당 2,400만 m³(해양연구소, 1990)을 적용하였으며 이 담수는 여자만(표면적 약 660 km²)과 23개 정점이 위치한 해역(표면적 375 km²) 염분을 낮추는데 사용되는 것으로 가정하였다.

관측시기별 수층평균염분과 수층의 염보존식 $H*S_1=(H+X)*S_2$ (조 등, 1993)을 사용하여 계산한 각 관측시기 사이의 수층내 담

Table 3. Freshwater increment between the observational periods in the unit water column of the upper 30 m layer (mean thickness of 17 m) in study area and the amount of fresh water supplied from the adjacent land and the precipitation over the study area during the same period.

Date	Salinity [psu]	F_w [mm]	F_h [mm]	F_r [mm]	F_e [mm]	F_y [mm]	F_T
31 May	33.35	243	40	128	81.7	30	116.3
20 June	32.88	57	40	239	78.7	55	255.3
11 July	32.77	436	80	385	163.0	89	391.0
19 Aug.	31.95	58	24	15	50.2	4	-7.2
31 Aug.	31.87	-42	24	0	55.4	0	-31.4
12 Sep.	31.94	721	24	12	79.0	3	-50.8
24 Sep.	30.64						

F_w = Freshwater needed in the unit water column between observation periods.

F_h = Freshwater supplied to the unit water column from Haechang reclamation area.

F_r = Precipitation at Gohung.

F_e = Evaporation at Yeosu.

F_y = Freshwater supplied to the unit water column from Yeoja Bay.

$F_T = F_h + F_r + F_y - F_e$.

수의 증감량, 고흥지방의 강수량, 여수지방의 증발량 및 해창만간 척지와 여자만에서 유입될 수 있는 담수량은 Table 3과 같다. 염보존식에서 H 는 17 m, S_1 과 S_2 는 인접한 두 관측시기의 평균염분, 그리고 X 는 인접한 두 시기 사이의 수층내 담수증감량이다.

5월 31일부터 9월 24일 사이에 수층내의 총 담수증가량은 1473 mm이며, 기간별로는 5월 31일과 6월 20일 사이에 약 243 mm, 7월 11일과 8월 19일 사이에 약 436 mm, 그리고 9월 12일과 9월 24일 사이에 721 mm가 증가하였고 다른 시기에는 수층내의 담수증가량이 60 mm보다 적거나 감소하였다. 반면에 강수 및 인접 육지로부터 공급될 수 있는 담수량은 5월 31일부터 8월 19일 사이에 762.6 mm이고 8월 19일부터 9월 24일 사이에는 오히려 증발에 의해 89.4 mm가 대기로 방출되어 총 관측기간 동안 이 해역으로 순 공급될 수 있는 최대 담수량은 673.2 mm이다. 이 양은 5월 31일부터 9월 24일 사이에 관측된 염분저하에 필요한 담수량의 45.7%에 해당되는 양이다.

그러나 각 관측시기별로 담수증가량과 담수공급량의 관계를 살펴보면 7월 11일과 8월 19일 사이의 기간동안에만 담수증가량과 공급량의 차이가 비교적 적을 뿐 기타 시기에는 담수증가량과 공급량 사이에 큰 차이가 있다. 즉, 5월 31일부터 6월 20일 사이에 공급될 수 있는 담수량인 116.3 mm에 비해 수층 내의 담수증가량은 공급 담수량의 2배가 넘는 243 mm이고, 6월 20일과 7월 11일 사이에는 공급될 수 있는 담수량이 255.3 mm인데 비해 수층 내의 담수증가량은 57 mm에 그쳤다. 약 391.0 mm의 담수가 공급된 7월 11일과 8월 19일 사이에는 수층 내 담수량은 약 436 mm가 증가하였으며, 담수의 공급보다는 증발에 의한 손실이 더 많은 시기인 9월 12일과 9월 24일 사이에는 관측기간 중 최대치인 721 mm의 담수가 증가하였다. 이와 같이 각 관측시기별 수층내의 담수증가량과 담수공급량 사이에는 상관관계가 높지 않다는 것은 연구해역의 강수나 육지에 의해 공급되는 담수량이 연구해역 23개

정점 전체의 염분변화의 주 요인이 아닌 것으로 해석된다.

남해외해역 저염수의 유입가능성

5월 31일부터 8월 19일 사이의 표층 염분분포도에서 연구해역의 북서쪽 정점들이 다른 정점에 비해 염분이 상대적으로 낮아 이들 정점의 북쪽과 서쪽으로부터 저염수의 공급가능성을 확인할 수 있었다. 이 들 지역에서 유입되는 저염수 및 연구해역의 강수가 23개 정점에서 관측된 염분변화를 설명할 수 있는지를 확인하기 위하여 23개 정점 수층 내의 담수증가량을 연구해역 북서쪽에 위치한 여자만과 해창만간척지에서 유입되는 담수량 및 연구해역의 해상강수량과 정량적으로 비교한 결과, 이 기간동안 이들 담수공급원으로부터 공급 가능한 최대 담수량은 수층내의 담수증가량의 45.7% 였지만 각 관측시기별로는 수층 내의 담수증가량과 공급량 사이에 뚜렷한 관계가 나타나지 않아 실제로 이들 담수공급원으로부터 공급되는 담수량은 23개 정점에서 관측된 염분변화의 주요인은 아닌 것으로 해석되었다. 따라서 연구해역에서 관측된 염분 저하에 대한 또 다른 요인으로 주위 해역에서 연구해역 해수보다 염분이 낮은 해수가 연구해역으로 유입되었을 가능성에 대한 논의가 필요하다.

연구해역의 남쪽에 위치한 남해 외해역은 하계에 양자강희석수로 불리는 저염수가 통과하는 해역으로 양자강희석수의 영향을 받기 시작하는 6월부터 염분이 낮아지기 시작하여 양자강희석수의 세력이 강한 8월에 최저 염분이 나타나고, 또한 이 시기에는 남해 연안역의 염분이 외해역보다 오히려 높게 나타나는 경우도 있다(정 과 신, 1994). 따라서 이와 같은 특성을 지닌 남해 외해역의 해수가 남측단면을 통해 연구해역으로 유입된다면, 연구해역의 염분은 인접 육지로부터의 담수공급이나 강수에 의한 담수공급이 없더라도 춘계에서 하계로 갈수록 염분이 낮아지는 남해외해역의 계절변화와 동일한 변화특성을 보일 수 있다. 이를 위해 국립수산전

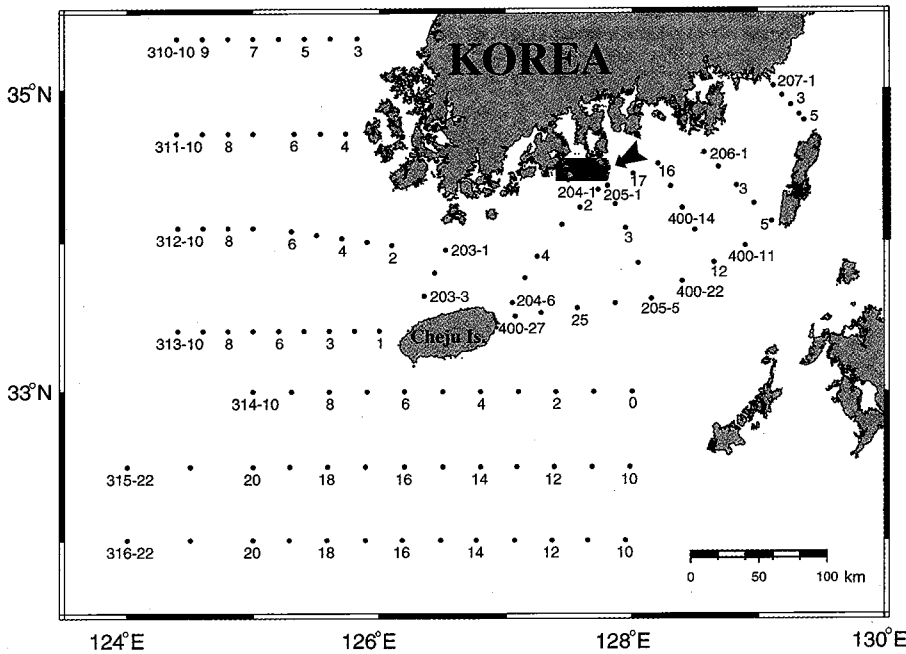


Fig. 7. Location of NFRDI serial oceanographic stations.

홍원의 1998년 정선관측자료 중에서 본 조사기간 중인 6월과 8월에 조사된 남해역 및 동지나해역의 수온 및 염분자료(조사정점은 Fig. 7참고)를 이용하여 남해 외해역으로부터 저염수의 유입가능성을 검토하였다.

6월 20일에 관측된 연구해역의 수층 평균수온 및 수층 평균염분은 직전 관측시기인 5월 31일에 비해 수온은 2°C 이상 증가한 20.6°C이고 염분은 약 0.5 psu 감소한 32.88 psu(Fig. 5참조)였고, 이와 같은 평균염분의 변화는 5월 31일과 6월 20일 사이에 인접 육지나 강수량에 의해 연구해역으로 유입될 수 있는 담수량 만으로는 설명할 수 없었다. 따라서 또 다른 염분저하 원인으로 남해 외해역으로부터 염분이 33 psu 이하인 저염수의 유입 가능성을 검토하였다. Fig. 8은 국립수산진흥원 정선관측선 203, 204, 205, 206, 207, 310, 311, 312, 313, 400에서 관측한 표층 수온 및 표층 염분자료로 구성된 1998년 6월의 남해 외해역 표층 수온 및 염분 분포이다. 관측시기는 1998년 6월 8일~6월 15일이고, 이 중에서 연구해역에 가까운 204, 205 정선은 6월 9일~6월 10일에 관측되었다. 본 연구해역 남측에서는 외해로 갈수록 수온은 높아지고 염분이 낮아지는데 연구해역으로부터 약 50 km 남쪽인 204정선 및 205정선의 3번 정점까지는 표층수온은 18.5~19°C 표층염분은 33.0~33.2 psu이고, 204정선 및 205정선의 3번과 이보다 남쪽에 위치한 4번 정점 사이에는 수온은 19°C에서 20°C로 약 1°C 증가하고 염분은 33 psu에서 32 psu로 약 1 psu 낮아지는 강한 수온 및 염분전선이 형성되어 있다. 또한 제주도 남쪽에는 표층수온은 21~22°C, 염분은 31 psu 이하인 저염수가 있고, 제주도 동쪽에는 표층수온은 20~21°C, 염분은 31~32 psu의 저염수가 분포하고 있다. 만약 Fig. 8에 나타난 연구해역 남쪽 약 50 km 이남 해역에 분포하고 있는 표층염분이 33.0 psu 이하인 해수가 6월 10일과 6월 20일 사이에 한국 연안쪽으로 접근하였다고 가정하면, 국지적인 담수공급만으로 설명할 수 없었던 6월 20일의 연구해역 염분

저하를 설명할 수 있다. 동시에 이 저염수의 수온이 연안역의 수온에 비해 높기 때문에 6월 20일에 관측된 수온의 급격한 증가도 설명이 가능하다. 김 등(2000)이 제시한 남해의 평균적인 해수순환 모델 결과에 의하면 남해에는 10 cm/s 이상의 해류가 남해 연안역과 가까워지거나 멀어지면서 동향하는데, 본 연구해역과 가까운 소리도 주위해역에서는 이 해류의 일부가 북향하고 있다. 이와 같은 남해의 해수순환 특성을 고려하면, 연구해역 남쪽 약 50 km 이남 해역에 위치한 표층염분이 33.0 psu 이하인 해수(Fig. 8)가 남해의 해수순환에 의해 6월 10일과 6월 20일 사이에 연구해역으로 유입되었을 가능성은 높은 것으로 해석된다.

Fig. 9는 국립수산진흥원의 1998년 8월 정선관측자료를 이용하여 구성한 남해외해역의 표층수온 및 표층 염분분포이다. 총 관측 기간은 8월 5일에서 8월 18일(국립수산진흥원, 1998)까지이고, 이 중에서 연구해역인 나로도와 소리도사이의 해역에 가까운 정선 204, 205, 206, 207 및 400 정선은 8월 5일~8월 7일에 관측하였다. 남해 연안에서 제주도 사이의 남해 외해역에서 완도 서쪽 남해 연안역을 제외한 전 해역의 표층 염분은 32 psu 이하이고 표층수온은 26°C 이상이며, 제주해협 서쪽과 제주도 남쪽해역에는 31 psu 이하의 저염수가 분포하고 있다. 반면에 나로도-소리도 해역에서 8월 19일에 관측된 표층 염분(Fig. 3b의 (d))은 여자만 입구해역에서는 30.27 psu, 소리도 해역에서는 31.6 psu로 여자만과 해창만 간척지에 가까운 연구해역 북서쪽 정점들에서만 8월 6~7일에 관측한 인접 남해 외해역의 염분에 비해 1 psu 정도 낮을 뿐 기타 정점에서는 8월 6~7일에 관측한 인접 남해 외해역의 표층염분과 큰 차이가 없다. 본 연구해역은 남해역의 국립수산진흥원 정선관측점들보다 한국 남해안 육지로부터 유입되는 담수의 영향을 많이 받을 수 있는 지리적인 여건에도 불구하고 여자만과 해창만 간척지 등 담수공급원에 가까운 북서쪽정점들에서만 남해 외해역의 표층염분보다 낮고 다른 정점들에서는 인접한 남해 외해역의 표

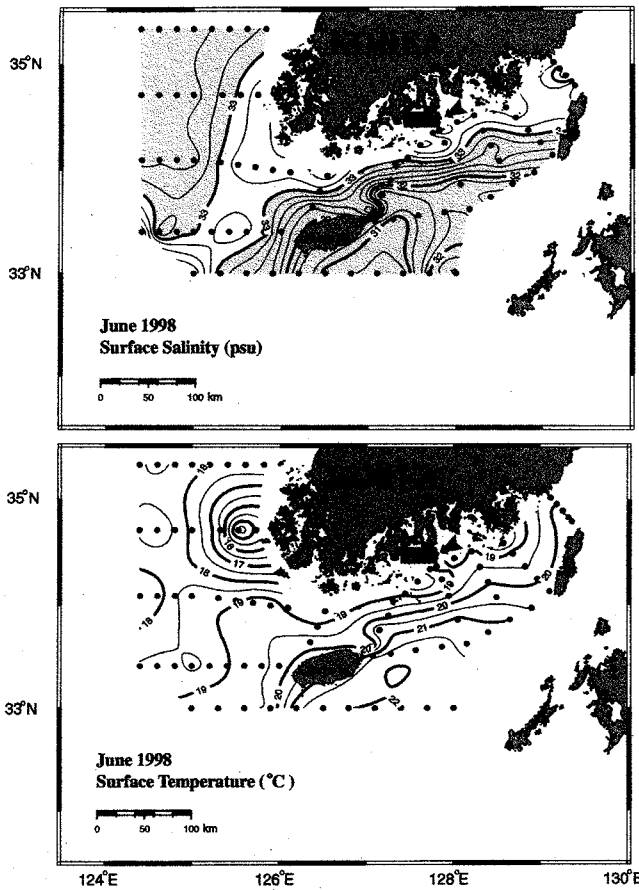


Fig. 8. Surface salinity (upper panel) and surface temperature distribution (lower panel) of the southern sea of Korea in June 1998 based on NFRDI's 1998 serial oceanographic data. Contour intervals are 0.5°C for temperature and 0.2 psu for salinity, respectively. The study area is marked by the small rectangle with bold arrow. The shaded part denotes the area having salinity lower than 33.0 psu.

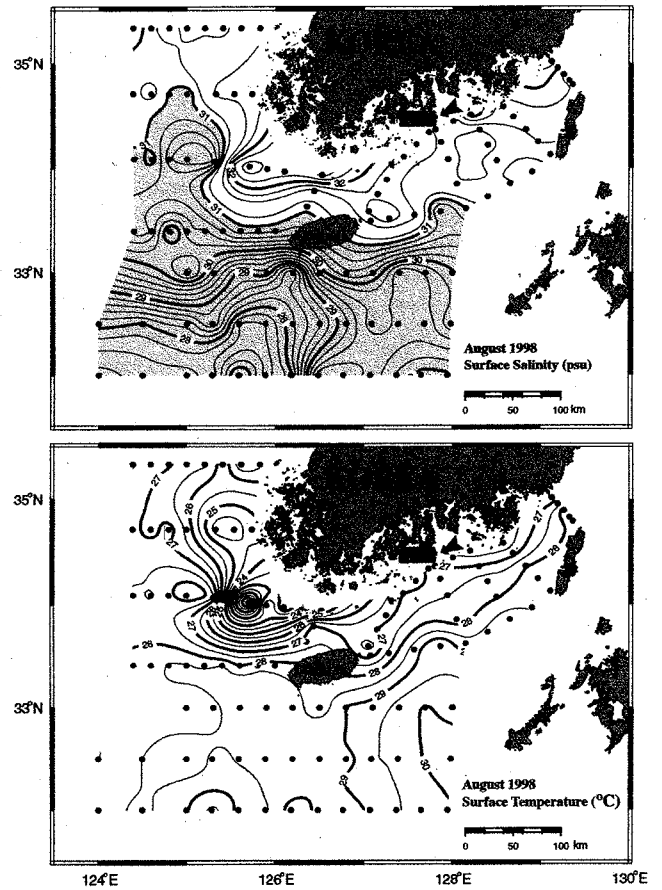


Fig. 9. Surface Salinity (upper panel) and surface temperature distribution (lower panel) of the southern sea of Korea in August 1998 based on NFRDI's 1998 serial oceanographic data. Contour intervals are 0.5°C for temperature and 0.2 psu for salinity, respectively. The study area is also shown by the small rectangle with bold arrow. The shaded part denotes the area having salinity lower than 31.0 psu.

층 염분과 큰 차이가 없다는 결과는 이 들 담수공급원으로부터 공급되는 담수의 영향이 연구해역인 나로도-소리도 해역의 전체 해수의 염분을 변화시킬 정도로 크지 않다는 것으로 해석할 수 있다.

연구해역의 강수량이 매우 적었던 9월 24일에는 직전 관측시기인 9월 12일에 비해 23개 정점 전체 수층의 평균염분은 31.0 psu 이하로 급격히 낮아지고 평균수온은 오히려 0.9°C 증가하였는데 (Fig. 6참조), 여기서는 이와 같은 해수물성의 급격한 변화가 남해외해역으로부터 저염수의 유입에 의해 일어났을 가능성을 검토하였다. Fig. 10은 1998년 8월 26일~31일에 조사한 남해역 표층염분분포(국립해양조사원, 1998)로 제주도 동쪽해역의 34°N 이남해역 (연구해역으로부터 약 50 km 남쪽)에 표층염분이 28~30 psu 인 저염수가 넓게 분포하고 있다. 그러나 이보다 앞서 관측한 Fig. 9의 표층염분분포에서는 28~30 psu의 저염수는 33°N 이남에서만 관측되었다. Fig. 9와 Fig. 10의 표층염분분포는 양자강회석수로 해석되는 저염수가 남해외해역으로부터 연구해역이 한국 남해안안역으로 접근하고 있음을 보여주는 증거로 해석된다. 즉, Fig. 10에 나타난 제주도 동쪽해역의 저염수는 8월 18일 이전에 33°N 이

남해역에 분포하던 저염수(Fig. 9)가 제주도 동쪽해역을 통해 한국 연안쪽으로 북상하여 나타난 것으로 해석할 수 있다. 따라서 저염수의 분포해역이 한국 남해안안쪽으로 확장되고 있음을 보여주는 남해역의 표층염분분포(Fig. 9, Fig. 10) 및 8월 26일~31일 현재의 저염수 해역과 연구해역의 거리가 약 50 km에 불과하다는 점(Fig. 10)을 비추어 볼 때, 9월 24일에 관측된 연구해역의 급격한 저염화가 Fig. 10에 나타난 제주도 동쪽해역의 저염수가 연구해역으로 유입되어 일어났을 가능성은 매우 높은 것으로 해석된다.

해석

5월 31일부터 8월 19일 사이의 표층 염분분포(Fig. 3b)에 의하면 연구해역의 북서쪽 해역에서 여자만이나 해장만간척지 담수의 영향을 받은 것으로 해석되는 저염수의 존재를 확인할 수 있었다. 이 들로부터 유입되는 저염수와 연구해역의 강수 및 증발 등에 의해 연구해역으로 공급되는 담수량을 각 관측시기별 수층 평균염분과 비교하였지만 이 들 사이에는 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없

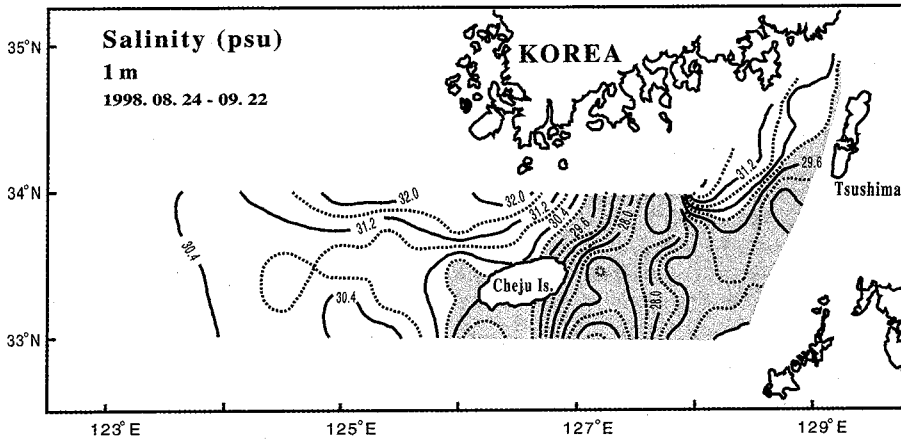


Fig. 10. Surface salinity distribution of the southern sea of Korea in August 1998 re-drawn from NORI (1998). Contour interval is 0.4 psu. The shaded part denotes the area having salinity lower than 30.0 psu.

었다. 강수량이 많았던 시기인 8월 19일의 표층 염분자료와 8월의 남해 외해역 표층 염분을 비교한 결과 연구해역 북서쪽 정점들에서만 남해 외해역의 표층 염분보다 낮은 염분이 관측되었고 기타 정점들에서는 남해 외해역의 표층염분과 큰 차이가 없다는 사실은 연구해역 북서쪽에서 유입되는 저염수나 연구해역의 강수가 연구해역의 염분변화의 주 요인이 아니라는 사실을 뒷받침하는 결과이다. 한편 6월과 8월의 남해 외해역의 표층 수온 및 염분 분포와 남해역의 해수순환을 고려하여 6월 20일과 9월 24일에 관측된 연구해역의 고온 저염화현상의 원인을 검토한 결과 이들 현상 역시 하계에 남해 외해역을 통과하는 저염의 양자강희석수가 연구해역으로 유입되어 일어났을 가능성이 높은 것으로 해석되었다. 이 결과들을 종합하면 연구해역의 평균적인 해수특성은 남해 외해역으로부터 유입되는 해수의 특성에 따라 주로 결정되며, 다만 강수량이 많았던 시기에 연구해역 북측 정점들에서 관측된 저

염수들은 인접한 육지로부터 유입되는 담수의 영향을 받아 나타난 것으로 해석된다. 이와 같은 해석은 양 등(2000)이 본 연구해역에서 1997년에 관측한 결과를 바탕으로 제시한 외해역 해수의 유입가능성과 부합하고 있으며, 이는 결국 이 해역의 해양환경이 정체된 환경이 아니고 외해역으로부터 유입되는 새로운 해수로의 교환이 활발하게 일어나는 환경임을 의미한다.

1998년 연구해역의 적조시기에 나타난 해황의 변화

본 연구해역을 포함한 남해안에서 1998년 8월 31일부터 9월 24일까지 보고된 'Cochlodinium Polykrikoides' 유해성 적조 발생현황은 Fig. 11과 같다. 남해안에서는 1998년 8월 30일에 본 연구해역 외나로도 남측해역과 외나로도 서측에 위치한 전남 장흥군 및

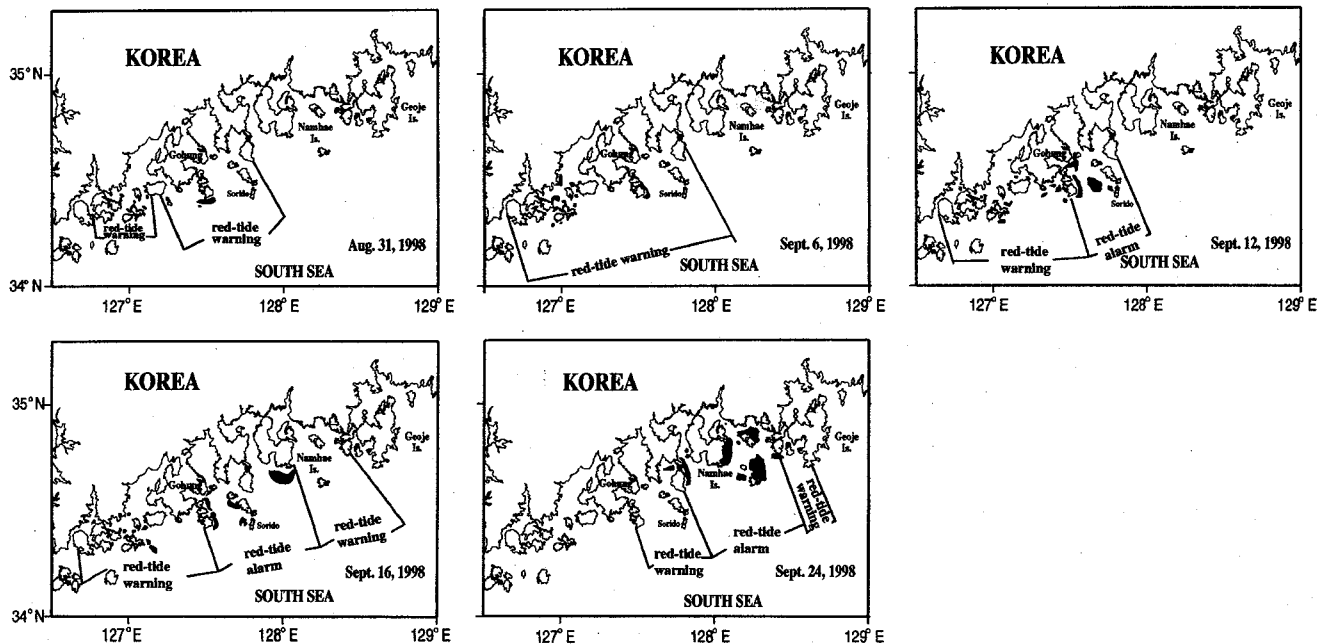


Fig. 11. Distribution of red tide by *Cochlodinium Polykrikoides* in the southern sea of Korea in 1998 re-drawn from the red tide break news (NFRDI Homepage) casted by NFRDI, Korea. The date is shown in each figure and the black areas denote the red tide patches.

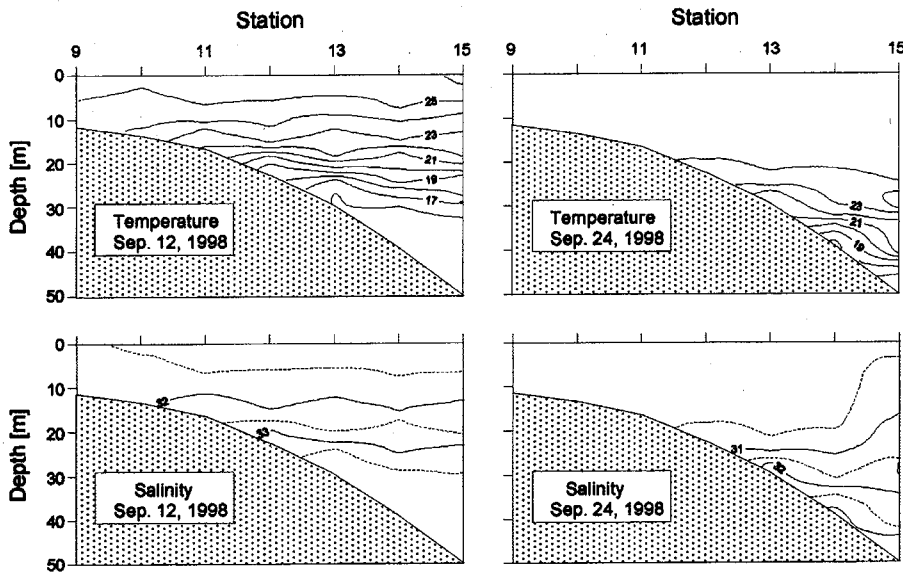


Fig. 12. Sectional temperature and salinity distributions along a solid line in Fig. 1 observed in September 12 and September 24.

완도군 연안역에서 최초로 발견되었다. 이 적조는 9월 12일 이전까지는 동쪽으로 확산이 되지 않았고, 9월 12일에는 동쪽으로 확장되어 외나로도와 소리도 사이 해역에서 적조가 발견되었고, 9월 16일에는 연구해역 동측의 남해도 남쪽해역에서도 적조가 발견되었다. 그러나 9월 24일에는 연구해역을 포함한 소리도 서쪽 해역의 적조는 사라지고 소리도 동쪽해역에서는 남해도와 거제도 사이 해역에서 적조가 넓게 분포하였다.

본 연구에서 8월 31일, 9월 12일, 그리고 9월 24일에 관측한 해수 물성자료는 각각 나로도와 소리도 사이 해역에서 적조 초기 발견시기, 적조가 동쪽으로 확장한 시기 및 적조가 사라진 시기의 자료인데 세 시기의 염분분포가 서로 다른 특징을 보이고 있다. 적조 초기시기인 8월 31일의 표층염분분포에 의하면 연구해역의 북쪽해역이 상대적으로 염분이 낮았지만(Fig. 3b의 (e)), 적조가 소리도 방향으로 확장한 9월 12일에는 연구해역 남측 외해역에서 유입되는 것으로 해석되는 저염수가 연구해역 남측에서 관측되었으며(Fig. 3b의 (f)), 적조가 완전히 사라진 9월 24일에는 연구해역의 표층염분이 급격히 낮아지고 표층염분의 공간적인 분포는 8월 31일과는 정반대로 남측에서 북측으로 갈수록 염분이 증가하는 특징을 보였다(Fig. 4b의 (g)). 이처럼 이 해역에서 동쪽으로 적조가 확장하는 시기에 연구해역 남측으로부터 저염수가 유입되고 적조가 완전히 사라진 시기에는 9월 12일에 비해 염분이 아주 낮은 해수가 연구해역 남측으로부터 북측으로 유입되고 있는 특징은 매우 흥미롭다. 이는 이 해역에서 적조가 사라진 원인이 물리적인 해수유동과 관계가 있을 수 있음을 제시하는 결과이기 때문이다.

특정해역에서 적조가 사라질 수 있는 기작으로 가능한 것은 해수유동에 의해 해역 외부로 적조가 이동하는 물리적인 기작(Steidinger *et al.*, 1998)과 수층구조에 따른 생물종간의 경쟁에 의해 적조가 소멸되는 생물학적인 기작을 들 수 있다. 여기서는 먼저 9월 12일과 9월 24일에 관측된 자료를 이용하여 생물학적인 적조소멸가능성을 검토하였다. 수층의 성층구조는 적조의 발생 및 소멸에 중요한 인자로 보고되고 있으며, 특히 성층의 약화는 생물학적으로 적조생물의 경쟁식물플랑크톤 종들에 대한 상대적 성장

잠재력을 저하시키는 것으로 알려져 있다(Eppley and Harrison, 1975). Fig. 12는 나로도와 소리도 사이 해역에서 적조가 존재하던 9월 12일과 적조가 사라진 9월 24일에 관측된 연구해역 남측의 정점 9~15 단면의 수온 및 염분의 단면구조이다. 9월 12일에는 수온과 염분의 수직성층이 강했지만 9월 24일에는 표층에서 약 20 m 깊이까지 수온 및 염분의 수직적인 차이가 크지 않은 혼합층 구조로 바뀌었으며 이 단면의 평균염분은 9월 12일에 비해 약 1 psu 이상 감소하고, 평균수온은 오히려 증가한 특징을 보인다. 이와 같은 특징은 연구해역의 중앙부(Fig. 5의 정점 19) 및 북쪽해역(Fig. 5의 정점 3)에서도 뚜렷하게 나타난다. 따라서 성층구조가 수직혼합구조로 바뀌었다는 사실만으로 보면 9월 12일의 성층구조가 조류에 의한 해저마찰력이나 바람 등의 물리적 요인에 의해 혼합층 구조로 바뀌었으므로 9월 12일에 존재하던 적조생물의 증식이 억제되어 9월 24일에는 연구해역에서 적조가 사라진 것으로 생물학적인 해석도 가능하지만, 이와 같은 생물학적인 해석은 9월 12일에 연구해역에 존재하던 해수가 새로운 해수로 바뀌지 않아야 한다는 가정 하에서 가능한 해석이다.

만약 9월 12일에 존재하던 해수가 새로운 해수로 바뀌지 않았다면 9월 12일과 9월 24일의 수층전체의 평균수온 및 평균염분은 큰 차이가 없어야 한다. 그러나 9월 12일에 비해 9월 24일에는 표층에서 약 30 m 깊이까지의 평균수온은 약 1°C 증가하고 평균염분은 약 1 psu 이상 감소하였기 때문에 9월 12일에 연구해역에 존재하던 해수가 9월 24일에도 계속 존재하였다고 해석할 수는 없으므로, 9월 24일에 관측된 해수는 9월 12일과는 물성이 전혀 다른 새로운 해수로 해석하는 것이 타당하다. 다음으로 9월 12일의 성층 구조가 9월 24일에 혼합층구조로 바뀐 물리적 원인을 검토하였다. 수층의 성층 구조를 혼합층 구조로 바꾸기 위해서는 바람이나 조류에 의한 마찰력이 강하게 작용해야 한다. 고흥지방에서 관측된 일평균 풍속자료(Fig. 2)에 의하면 9월 15일부터 9월 24일 사이에 약 2 m/s 내외의 바람이 불었는데, 이 풍속은 5월에서 9월까지의 일평균 풍속의 평균값인 1.67 m/s 보다 특별히 높은 값이 아니다. 또한 이와 유사한 크기의 바람이 불었던 시기인

7월 11일과 8월 19일의 표층과 저층의 수온 및 염분분포(Fig. 3a, b, Fig. 4a, b)에서 수심이 20 m 이상인 정점들에서는 표층과 저층의 수온 및 염분차가 크다는 사실을 고려하면 9월 15일부터 9월 24일 사이에 관측된 고힥 지방의 바람이 9월 12일의 성층구조를 9월 24일의 혼합층구조로 바꾼 원인은 아닌 것으로 해석된다. 수층의 수직혼합을 유발시키는 다른 요인으로 조류에 의한 해저마찰력이 있다. 그러나 수로국(1981)에 따르면 이 해역의 조류(대조기 최강유속이 최대 1 Kn)는 수층내의 수직혼합이 활발히 일어나는 한국 서해 연안역의 조류에 비해 강하지 않으며, 더구나 7회의 관측 중에서 9월 24일에만 이와 같은 혼합층 구조가 관측되었다는 사실은 조류에 의한 해저마찰력 역시 9월 12일의 성층구조를 9월 24일의 혼합층 구조로 바꾼 주요 물리적 원인이 아님을 의미한다.

따라서 9월 12일과 9월 24일 사이에 수층전체의 평균 수온 및 평균 염분의 변화가 크게 나타났다는 사실과 이 두 시기 사이에 수층 구조를 변화시킬 수 있는 바람 및 조류 등의 물리적인 요인들에 대한 검토 결과로부터, 적조가 사라진 9월 24일에 관측된 해수물성 및 수층구조의 급격한 변화는 앞 절에서 해석된 바와 같이 남해 외해역으로부터 저염수가 연구해역으로 유입되어 일어난 것으로 해석하는 것이 타당하다. 이는 결국 9월 12일과 9월 24일 사이에 물리적인 해수유동에 의해 연구해역의 해수가 새로운 해수로 교환되었음을 의미한다. 이처럼 적조가 사라진 시기에 수층구조와 해수물성의 변화가 동시에 일어난 현상은 1997년에도 양등(2000)에 의해 본 연구해역에서 관측된 바 있다. Sharples *et al.* (1997)과 Steidinger *et al.* (1998)은 물리적인 해수유동에 의해 적조생물이 외양역에서 연안역으로 수송되어 연안역의 적조가 발생함을 제시하였는데, 이들의 결과는 특정해역에 있던 적조생물이 물리적인 해수유동에 의해 다른 지역으로 수송될 수 있음을 의미한다. 이 둘 결과와 적조가 사라진 9월 24일에 관측된 해수물성 및 수층구조의 급격한 변화 원인에 대한 고찰 결과를 종합하면 이 해역에서 9월 24일에 적조가 사라진 주요한 원인 중의 하나로 해수 유동을 들 수 있다. 즉, 물리적인 해수유동에 의해 적조생물이 분포하던 시기인 9월 12일의 연구해역의 해수가 연구해역 남측으로부터 유입되는 특성이 다른 해수로 교체되면서 연구해역 밖으로 이동됨으로서 관측자의 관점에서는 연구해역의 적조가 소멸된 것으로 해석할 수 있다. 이외에 연구해역에서 적조가 동쪽으로 확장하던 9월 12일에 연구해역 동쪽에 있는 남해도 주위에서 적조가 발생하고 연구해역에서 적조가 완전히 사라진 시기(9월 24일)에는 거제도 해역까지 적조가 확산되었다는 사실도, 남해안의 해역별 적조발생시기가 남해의 물리적인 해수유동(김 등, 2000)과 관계가 있을 수 있음을 시사하는 결과로 해석된다(Fig. 11).

요약 및 결론

여름철에 유해성 적조가 발생하는 전남 고힥군 나로도 와 전남 여수시 소리도 사이의 해역내의 23개 정점(조사해역면적 약 375 km²)에서 1998년 5월 31일부터 9월 24일까지 약 7회에 걸쳐 수온 및 염분을 조사하였다. 이 해역의 수온 및 염분은 관측후반부로 갈수록 수온은 증가하고 염분은 낮아졌는데 이와 같은 수온 및 염분의 변화는 표층에서 약 30 m 깊이까지 거의 전 수층에서 일어났으며, 6월 20일과 9월 24일에는 수심이 50 m 이상인 정점들

의 저층에서도 직전시기에 비해 수온이 높아지고 염분은 낮아지는 현상이 관측되었다. 표층염분분포에 의하면 강수량이 많았던 5월 31일~8월 19일 사이에는 여자만 입구에 가까운 북서쪽 해역의 염분이 상대적으로 낮았고, 강수량이 매우 적었던 9월 12일과 9월 24일에는 남해외해역에 개방된 연구해역 남측의 염분이 상대적으로 낮았다. 각 관측시기별로 총 23개 정점의 표층에서 저층까지(30 m 보다 깊은 정점에서는 30 m를 저층으로 적용) 전체해수의 평균염분과 연구해역의 강수, 연구해역 서쪽 및 북쪽의 해창만 간척지와 여자만에서 공급가능한 담수량과의 정량적 비교 및 6월 20일, 8월 19일, 그리고 9월 24일의 결과와 남해역의 6월과 8월의 표층염분자료를 정성적으로 검토한 결과 나로도 와 소리도 사이 해역의 전체적인 해수특성은 주로 남해외해역을 통과하는 해수특성에 의해 지배되는 것으로 해석되었고, 여자만과 해창만 간척지를 통해 유입되는 육수는 이 둘 지역과 가까운 북서쪽 정점들에만 영향을 주는 것으로 해석되었다.

연구해역에서 적조가 처음 발생한 8월 31일, 적조가 동쪽으로 이동하던 9월 12일, 그리고 연구해역에서 적조가 사라진 9월 24일의 표층염분분포는 서로 다른 특징을 보였는데, 특히 적조가 동쪽으로 이동한 시기인 9월 12일에는 남해외해역에 인접한 남측해역에서 저염수가 유입되는 염분분포가 관측되었으며 적조가 사라진 9월 24일에는 표층염분이 급격히 낮아지고 염분도 남해외해역에 개방된 남측해역에서 낮게 나타났다. 특히 9월 24일의 염분이 급격히 낮아진 현상은 전층에 걸쳐 나타났으며 수층구조도 9월 12일의 성층구조에서 9월 24일에는 표층에서 약 20 m 깊이까지 혼합층으로 바뀌었다. 9월 24일에 관측된 물성 및 수층구조의 변화 원인은 연구해역 남측 외해역으로부터 유입되는 해수에 기인하는 것으로 해석되었으며, 이 결과는 이 시기에 연구해역에서 적조가 사라진 현상이 이 해역의 해수유동과 관련이 있을 것으로 해석되었다.

본 연구결과는 1995년 이후 매년 하계에 적조가 발생하는 나로도 와 소리도 사이의 해역의 여름철 해수특성이 남해외해역의 해수특성에 의해 주로 지배되고 있음을 보였다. 연안역에서 기존에 수행된 연구들은 대부분 육지로부터 유입되는 환경학적 요인들이 연안역의 환경에 미치는 영향을 주로 고려하였지만, 본 연구해역과 같이 외부로부터 다른 특성을 지닌 해수가 유입되는 경우에 유입된 해수의 환경학적 인자들이 연구해역의 해양환경을 지배할 수 있기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 적조소멸기 전후에 외부로부터 유입되는 해수에 의해 연구해역의 해양환경이 크게 바뀌었다는 사실은 이 해역에서의 적조 발생과 남해역 해수유동특성과의 관계에 대한 연구의 필요성도 제시하는 결과이다. 따라서 계절에 따라 서로 다른 특성을 지닌 해수가 통과하는 남해의 연안역에서 매년 하계에 나타나는 적조의 발생기작을 밝히기 위해서는 인접 연안역에서 유입되는 환경요소 외에도 대상해역을 포함한 광범위한 남해역의 해수순환, 그리고 이 순환에 의해 수송되는 해수의 물리, 생물 및 화학적 특성에 대한 종합적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소과제 연구비 지원에 의하여 연구되었고, 과학기술부·한국과학재단 지

정 군산대학교 새만금환경연구센터의 일부지원에 의한 것입니다. 원고의 세심한 부분까지 자세히 검토하여 수정해 주신 한국해양연구소의 장경일 박사님과 제주대학교 노홍길 교수님께 감사드립니다. 또한 현장관측에 도움을 주신 전라남도도청 이인곤 과장님과 현장관측과 자료정리에 많은 시간과 노력을 아끼지 않은 군산대학교 김영근, 김재훈, 김형준군에게 감사드립니다.

참고문헌

- 국립수산진흥원, 1997. 한국 연안의 적조. 280 pp.
- 국립해양조사원, 1998. 수로기술연보. 103-190.
- 국립수산진흥원, 1998. 해양조사연보. 545 pp.
- 김상우, 조규대, 노홍길, 이재철, 김상현, 신상일, 1995. 1992-93년 하계 득량만의 수온과 염분의 분포. 한국수산학회지, **28**(1): 7-14.
- 김충기, 장경일, 박경, 석문식, 2000. 한국 남해의 해수순환: 2차원 순압모델. 한국해양학회지 '바다', **5**(4): 257-266.
- 수로국, 1981. 조류도. 서지 제1421호, 18 pp.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥해역의 유해성적조의 발생연구: 1. 물리, 화학적인 특성. 한국해양학회지 '바다', **5**(1): 16-26.
- 여수대학교, 1995. 해창만 배수갑문 시설에 따른 어업권 피해 감정조사보고서. 47-58.
- 정규진, 신석우, 1996. 여수연안 및 동중국해의 세균상: 1. 일반세균, *Vibrio* spp., 대장균군 균수에 따른 수평분포. 한국수산학회지, **29**(1): 9-16.
- 조양기, 김 구, 노홍길, 1995. 여름철 남해의 저염화와 수송량. 한국해양학회지, **7**(1): 126-134.
- 추효상, 이규형, 윤양호, 1997. 거금수로 해역의 수온과 염분의 변동. 한국수산학회지, **30**(2): 252-263.
- 한국해양연구소, 1990. 순천만 어장(양식물)피해 원인 조사연구, BSPI 00096-293-3, 467 pp.
- Eppley, R.W. and W.G. Harrison, 1975. Physiological ecology of *Gonyaulax polyedrum*, a red tide water dinoflagellate of southern California. In: Locicero, V.R. (ed.), Proceedings First International Conference on Toxic Dinoflagellate Blooms, Wakefield, Massachusetts, Massachusetts Science and Technology Foundation, pp. 11-22.
- Sharples, J., 1997. Cross-shelf intrusion of subtropical water into the coastal zone of northeast New Zealand. *Cont. Shelf Res.*, **17**(7): 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. G41 edited by D.M. Anderson, A.D. Cembetla and G.M. Hallegraeff. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 133-153.

2001년 1월 5일 원고접수

2001년 5월 3일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학