

동중국해 북부해역의 겨울철 수계와 전선구조

손영태¹ · 이상호^{1*} · 이재철² · 김정창²

¹군산대학교 해양과학대학 해양정보과학과

²부경대학교 해양과학 공동연구소

Water Masses and Frontal Structures in Winter in the Northern East China Sea

YOUNG-TAE SON¹, SANG-HO LEE^{1*}, JAE CHUL LEE² AND JEONG-CHANG KIM²

¹Department Ocean Science Information, Kunsan National Univ., Kunsan, 573-701, Korea

²Korea Inter-university Institute of Ocean Science, Pukyong National Univ., Pusan, 608-737, Korea

겨울철인 1998년 2월과 1999년 1월, 4월에 남해와 동중국해 북부해역에서 형성되는 전선의 분포와 구조를 파악하기 위하여 광역의 종합해양관측을 수행하였다. 관측해역에서 구분된 수계들은 대마난류기원 고온수, 황해냉수(북부냉수 혹은 중앙냉수) 그리고 남해저온수로 분류된다. 황해남부 해역에서는 제주도 서쪽을 우회하여 제주해협으로 유입하는 대마난류기원 고온수가 'Γ'자 형태의 기본적 전선을 이루며 대흑산도 남쪽에 황해중앙냉수와 그리고 양자천퇴 동부에서 황해북부냉수와 만나고 있다. 이 전선은 고온수가 황해 북서부로 확장하는 세기에 의해 전선 모서리 형태와 위치가 달라진다. 양자천퇴 부근과 한반도 남서단 외측에서의 전선위치와 구조도 관측시기에 따라 변화한다. 남해 전선에서는 연안 저온수가 국지적 냉각에 의해 독립적으로 형성된 수계로서 해저사면을 따라 침강한다. 이러한 겨울철 전선분포의 변화와 전선구조가 변화되는 과정은 탁월풍에 의한 순풍류 및 역풍류, 해수면을 통한 열수지 그리고 전선사이의 밀도차이에 의한 것으로 설명되었다.

During the winter in February 1998, January and April 1999, interdisciplinary research was conducted in a large area including the South Sea of Korea and northern East China Sea to examine distribution and structure. Water masses identified from the observed data are Warm Water originated from Tsushima Warm Current, Yellow Sea Cold Water (Northern or Central Cold Water) and Korean Southern Sea Cold Water. In the southern Yellow Sea, Warm Water originated from Tsushima Warm Current, flowing into the Cheju Strait after turning around the western Cheju Island, makes a front of 'Γ' shape, which is bounded by the Yellow Sea Central Cold Water in the southern part of Daeheuksan Island and by the Yellow Sea Northern Cold Water in the eastern part of the Yangtze Bank. This front changes its corner shape and position with strength of the warm water extension toward northwestern Yellow Sea. The position and structure of the fronts off the southwestern tip of the Korean peninsular and near the Yangtze Bank varies with observation period. In the front in the South Sea of Korea, cold coastal water which is formed independently due to local cooling, sinks along the sloping bottom. We explained the processes of variations in the distribution and structure of these winter fronts in terms of up-wind and down-wind flow by the seasonal monsoon, heat budget through the sea surface and density difference across the fronts.

Key words: Front Structure, Shelf Front, Yellow and East China Sea, Water Mass

서 론

우리나라 남해를 포함한 동중국해 북부해역(Fig. 1)은 남쪽의 동중국해, 서쪽의 황해, 동쪽으로 대한해협을 통하여 동해와 연결되는 길목으로 각 지역의 수계가 만나는 해역이다. 이 해역에 영향을 주는 수계로는 쿠로시오 및 그 지류인 대마난류수, 황해난류

수와 중국대륙 담수희석수, 황해 저층냉수와 대한해협쪽의 동해해수 등 다양한 기원의 수괴들이 분석되어져 왔다(Nakao, 1977; Kondo, 1985; Park, 1985, 1986a; Lie, 1985; Beardsley, *et al.*, 1985; Kim *et al.*, 1991; Chen *et al.*, 1994). 연구해역에서 가장 뚜렷한 해류는 동중국해에서 동해로 유입하는 대마난류로서 제주도를 우회하는 제주해류를 포함하며, 그 외 수계는 계절에 따라 점유지역과 이동이 변한다(김 등, 1991; Lie *et al.*, 1998; Chang *et al.*, 1995 and 2000; Suk *et al.*, 1996).

*Corresponding author: sghlee@kunsan.ac.kr

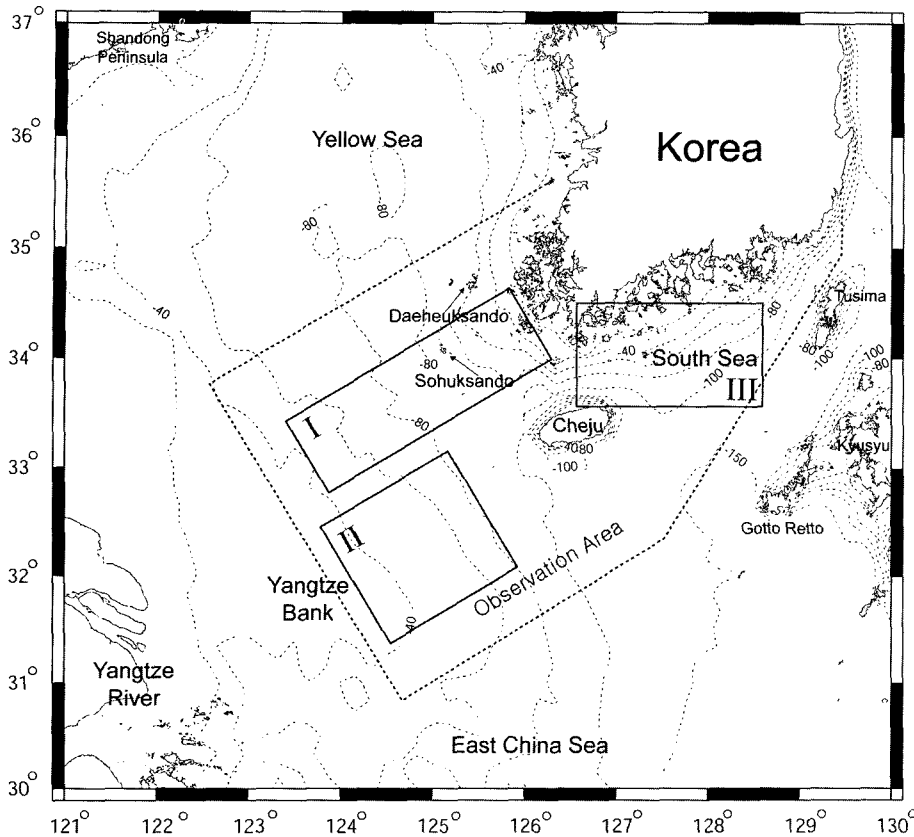


Fig. 1. Map of study area with bottom contours in meter. The bold dash line denotes a whole observation area and three solid boxes indicates subarea where typical front was formed.

연구해역은 수심이 150m 미만인 지형적인 특성으로 인하여(Fig. 1) 겨울철에는 낮은 기온의 탁월풍이나 표층을 통한 열수지에 따라 물성의 구조와 분포가 영향을 받는다(송, 1992; 이와 송, 1994). 또한 큰 조석에너지에 의해(Choi, 1980) 조류가 해류보다 강하여 해수유동에 상당한 영향을 미치고(Odamaki, 1989), 양자천퇴 주변과 한반도 남서단 주변 등에서 조류혼합에 의한 조석전선이 물성분포와 순환에 영향을 주며(Kim and Lee, 1982; Beardsley and Limburner, 1983; Lie, 1989) 조석잔차류가 하계 성층조건에서는 순환계의 40%까지 달할 수 있다(Lie and Beardsley, 1999). 겨울철 탁월풍과 강한 조류에 의한 혼합으로 대부분 수직적으로 잘 혼합된 구조를 이루게 되고, 북태평양에 열려있는 반폐쇄 형태에 의해 순풍류와 역풍류가 발달하여 순환체계가 변동되기도 한다(Park, 1986b; Hsueh and Yuan, 1997; Riedlinger and Jacobs, 2000; Teague and Jacobs, 2000).

본 연구해역에서 다양한 해수특성을 갖는 수계 사이에 형성되는 전선역에서는 강한 수평적 특성차이를 보이게 된다. 겨울철에는 황해 남쪽 양자천퇴 주변에(Fig. 1, II구역) 저온-저염수가 남동쪽으로 향하는 척모양의 분포를 이루며 대마난류수와 전선을 형성하며 한반도 남단 서쪽(I 구역)으로 황해냉수와 대마난류수가 강한 전선을 이룬다(Asaoka and Moriyasu, 1966; Kondo, 1985; Nakao, 1977). 두 곳의 전선은 제주도 서쪽에서 연결되어 그리스 문자인 'Γ'자의 기본형태를 유지하지만(Lie, 1985; Chen *et al.*, 1994), 'Γ'자 분포의 전선모서리 형태는 황해냉수와 대마난류수의 이동에 따라 자주 변화하며 이를 겨울철 황해난류의 발생으로 해석하기도 하였다(Lie *et al.*, 2001). 한편, 남해연안에서는(III 구역)

여름철과 겨울철에 연안에 평행하게 형성된 전선의 존재를 공(1971)이 최초로 보고하였으며, Lim(1976)은 겨울철 표층냉각으로 인한 남해연안수의 침강을 제안한 바 있다. Lee(1983)와 Lee *et al.*(1984)은 제주해협과 대한해협에서 초겨울에 형성된 전선의 구조와 전선역 부근에서의 강한 수온·염분 역전현상의 변동성에 관하여 논의하였는데 전선 구조가 인접 해역에서 유입되는 수괴와 해류에 영향을 받으며 수 일에서 수 주의 관측 주기에 따라 큰 변동성을 보인다고 하였다.

최근에는 황해난류의 존재여부와 형태 및 발생기작을 밝히기 위하여 물성(밀도장) 관측(Kim *et al.*, 1991; Chen *et al.*, 1994; Lie *et al.*, 2001)과 해류관측(Beardsley *et al.*, 1992; Jacobs *et al.*, 2000)이 수행되었다. 겨울철의 경우에는 탁월풍에 의한 순환수치 모델과 해면높이변동(Jacobs *et al.*, 1998; Riedlinger and Jacobs, 2000) 등을 연구하여 간헐적으로 발생하는 역풍류를 황해난류로 제시하고 있다. 이러한 관측자료 분석과 수치모델 연구는 대부분 황해와 동중국해 전역에 걸친 연구로서 바람, 밀도장 및 쿠로시오 관성력 등의 외력에 대한 대륙붕 해수의 전반적 반응을 대상으로 하고 있다. 하지만 동중국해 북부해역에서 형성되고 있는 겨울철 전선분포가 연간 혹은 월단위에 걸쳐 어떠한 변동을 보이며 전선들의 수직구조는 지역과 시간에 따라 얼마나 차이가 나는지 등에 대한 정밀구조 관측과 분석보고는 수행된바 없다.

한국 대학공동 해양과학연구소 주관으로 공동 연구선인 탐양호(부경대학교)를 이용하여 1997년 8월부터 2000년 10월까지 남해 및 동중국해 종합정밀 해양관측을 수행하였다. 본 연구에서는 황해 남쪽입구, 양자천퇴 주변을 포함하는 광역에서 물성분포와 구

조를 관측한 자료 중에서 겨울철 자료를 이용하여 수계변화와 전선구조를 분석하였다. 조밀한 간격의 정점들로 구성된 관측단면들에서 2년에 걸쳐 조사된 수계분포의 특징과 변동성, 지역별 전선구조의 특징과 시간적 변화를 비교할 수 있었으며, 전선의 구조와 분포의 변화기작에 대해 기존에 연구된 바람에 의한 수계이동(순풍류와 역풍류)과 겨울철 표면 열손실과정을 가설로 설정하여 정성적으로 토의하고자 한다.

관 측

겨울철 조사는 1998년 2월과 1999년 1월 및 4월에 수행되었으며, 남해와 동중국해 북부해역에서 관측된 CTD(SBE-911 plus) 정점은 Fig. 2와 같다. 1998년 2월에는 남해와 제주도 서쪽을 중심으로 관측하였으며, 관측단면은 남해 연안에 수직한 방향과 동중국해 북부해역의 양자친퇴 주변에서 등심선에 수직한 방향으로 설정하였다. 1999년 1월과 4월에는 2월의 관측구역을 제주도 남쪽 난류지역과 황해입구의 북쪽으로 확대하기 위해 일부 관측단면의 위치 및 방향이 조정되었고 단면명칭을 변경하였다. 본 연구에서

는 전선구조의 변화를 보기위해 각 지역별로 인접한 단면구조를 비교하였다. 관측점 간격은 수계 특성과 전선의 정밀한 수직구조를 관측하기 위하여 관측선 마다 약 6~10해리 간격으로 설정하였다. 물성자료는 수직적으로 0.5 m 간격으로 처리하여 분석하였다. 관측구역이 넓고 겨울철 탁월한 북풍으로 인해 관측이 일시 중지되어 관측기간은 일주일 이상 소요되었지만 한 단면이 도중에 중단되지 않게 하였으며 각 시기의 단면별 관측일정은 Fig. 3에 표시되었다.

본 연구해역의 기상조건을 대표할 수 있는 흑산도 측후소에서 관측된 바람자료를 분석하였다(Fig. 3). 1998년 2월에는 관측시작 약 일주일 전부터 강한 북풍 및 북동풍이 4일 이상 지속되었다가 동풍 및 동남풍으로 바뀌었으며 관측 중·후반부에는 다시 북풍으로 바뀌어 세기가 다소 약해졌다. 1999년 1월에는 20일경부터 강한 북풍과 약한 남풍이 2-3일 간격으로 교대되었고 관측 중반부터 북풍이 약 10일정도 지속되었다. 4월에는 북풍과 남풍이 2-3일 간격으로 뚜렷하게 나타나 탁월풍이 없어졌다. 한편, 3회의 조사에서 일주일 이상의 관측기간으로 인해 특성치의 시간적 변화가 특성분포에 공간적 변화와 변형으로 포함되었을 가능성이 있다. 또한 각 시기의 관측 자료에서는 전선분포의 시간적 변화과정을 알기 어렵다. 이러한 점을 보완하기 위해 광역을 동시에 관측한 AVHRR(NOAA-12, 14) 인공위성 영상 수온분포를 이용하였으며 본 연구에서 관측된 수온의 공간적 분포와 비교하였다.

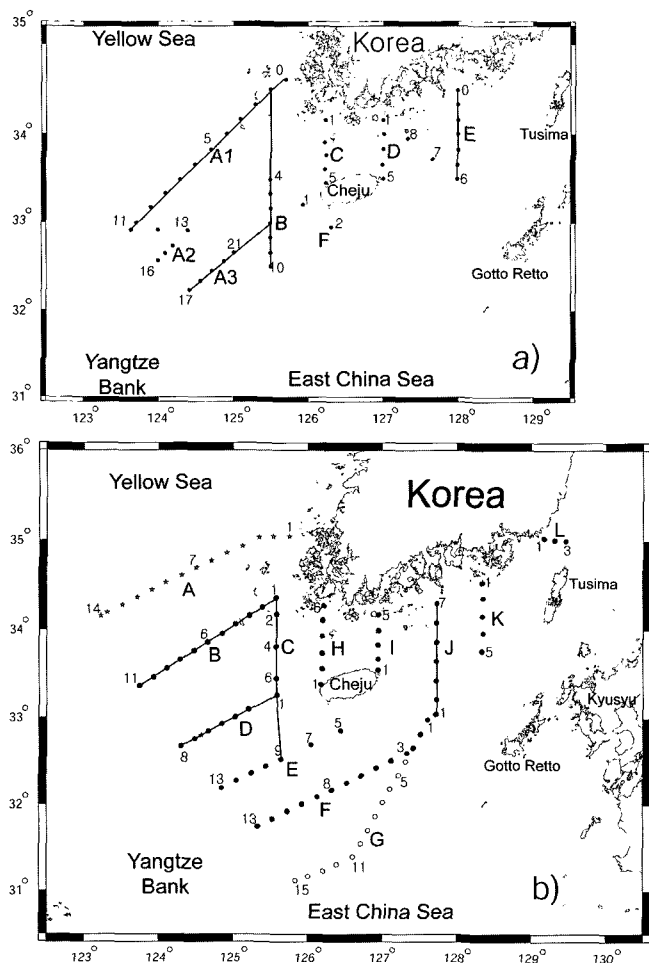


Fig. 2. Locations of CTD stations taken in February 1998 (a), January and April 1999 (b). Capital alphabet denotes section name. The closed circle in (b) is occupied in both January and April, open circle only in January and star only in April.

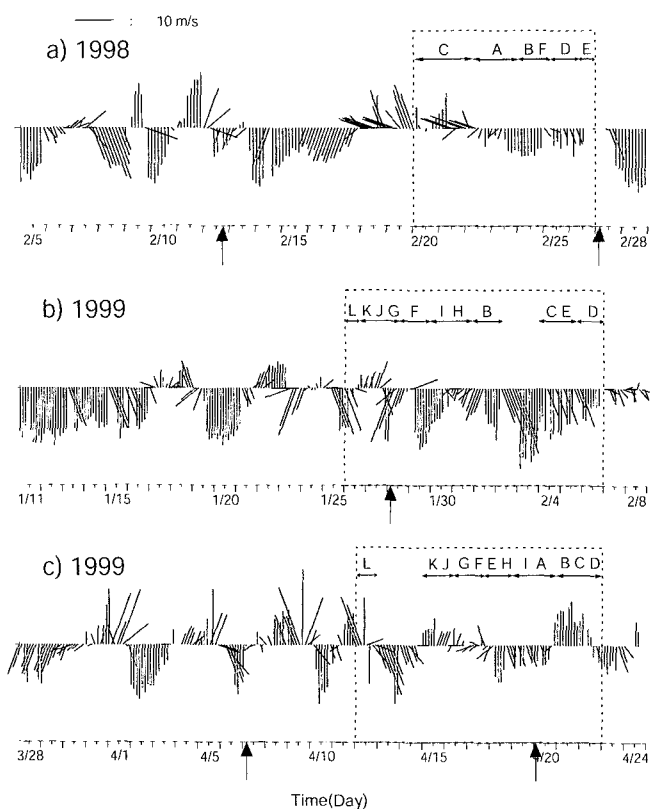


Fig. 3. Time series of wind vector measured at DaehuksanDo wind station (see Fig. 1) for each cruise. Vertical arrows denote time of AVHRR image by NOAA-12 and 14. Dash box and horizontal arrows indicate the period of CTD observation and time of section occupation, respectively.

수계구분 및 분포

수계구분

수온과 염분의 관계도(Fig. 4)는 조사해역의 겨울철 수계곡선의 특성을 잘 보여준다. 1999년 1월과 4월에 관측된 대한해협 서수도 관측선 L의 특성곡선들을 제외하면(10°C 이하 34‰ 이상으로 연결된 곡선으로 이후부터는 비교 및 논의 대상에서 제외함) 대부분의 해수가 $25 < \sigma_t < 26$ 밀도범위 내에 있다. 특성곡선 길이가 짧고 특성치가 한 지점에 모여 있는 정점들이 많아 대부분의 수층이 수직적으로 잘 혼합되어 있음을 보여준다. 하지만 수온과 염분의 변화범위는 7°C 보다 크고 2‰ 이상으로서 고온-고염과 저온-저염의 성격이 다른 해수가 조사구역에 있음을 알 수 있다.

1998년 2월에는 약 12°C 와 약 33.7‰의 특성을 갖는 수괴를 중심으로 고온-고염수와 저온-저염수로 대별할 수 있는데 Kim *et al.*(1991)이 분석한 바와 같이 고온-고염수는 대마난류기원 고온수(group 4, 동중국해수)로 분류되며 저온-저염수는 황해내부와 중국 대륙의 담수영향을 받은 황해냉수(Nakao, 1977) 혹은 황해중앙냉수(Kondo, 1985)로 분류된다. 저온-저염수는 9°C 이상 32.5‰ 이하의 저염수와 9°C 이하 32.5‰ 이상의 저염수로 확연히 구별되기 때문에 관측해역에 상이한 특성을 갖는 저염수들의 존재를 시사한다. 특히 32.5‰ 이하 저염수의 특성곡선들은 상층(저밀도)의 저염에서 하층의 고염으로 연결되어 있어 서로 다른 수계가 수직적으로 만나고 있음을 의미한다. 32‰ 이하의 저염 특성은 겨울철에 황해북부와 산둥반도 남쪽 중국 연안역을 따라 양자천퇴 주변까지 분포하는 냉수(Kim *et al.*, 1991, group 2)로서 본 연구에서는 황해북부냉수로 명명하였고, 9°C 이하 32.5‰ 이상의 저염수는 황해중앙냉수(group 3)로 분류하였다. Chen, *et al.*(1994)에 의하면 황해내부에서는 두 수계가 지리적으로 접하고 있다. 한편, 조사해역에서 밀도가 가장 큰 해수($\sigma_t=26$)는 33.5‰ 이상의 고염수에서 수온이 12°C 이하인 수계이다. 이 수계는 남해 정점 E1과 E3에서 관측되었으며 주변수와 고립된 특성을 보임에 유의해야하

며 남해저온수로 분류될 수 있다(Lim, 1976; Kim *et al.*, 1991, group 5).

1999년 1월 대부분의 관측점에서 나타나는 특성곡선의 형태는 기본적으로 1998년 2월의 경우와 유사하지만 저온-저염수 중에서 32.5‰ 이하의 저염인 황해북부냉수가 관측해역에 나타나지 않았다. 이로 인하여 11°C 이하의 저온수는 32.8‰을 기준으로 염분에 의해 세분할 수 있으며 상대적으로 저염인 해수는 황해중앙냉수이고, 밀도가 가장 큰 33.3‰ 이상인 10°C 미만의 해수는 2월과 유사하게 남해연안 정점들에서 관측된 남해저온수이다. 한편, 동중국해 중앙부의 관측선과 대한해협에서의 관측선이 새롭게 추가되어 상대적으로 큰 수온의 변화폭(13°C 이상)을 나타내고 있으며 2월에 비해 15°C 이상, 34‰ 이상의 상대적 고온-고염수가 많이 관측되었다.

늦겨울에 해당하는 1999년 4월에 관측된 수온과 염분의 관계도는 겨울철에서 봄철로 변화되는 과정임을 보여준다. 관측점 대부분의 특성곡선은 1월에 비해 상대적으로 길어졌다. 특성곡선들이 33‰ 보다 낮은 저염쪽에 많이 나타났고 수직적 수온차이가 증가하여 밀도차이가 증가하고 성층구조가 발달하고 있음을 나타낸다. 특히, 특성곡선이 $\sigma_t=25.3$ 부근의 등밀도면을 따라 저온 저염쪽으로 향하며 중첩되는 쉼기형태로 나타나는 관측점이 많아 저온-저염수의 중층을 통한 관입으로 인해 대규모적인 역전현상이 일어나고 있음을 시사한다. 1월에 $\sigma_t=25$ 선상에 특성이 나타났던 수직적으로 균일한 성격의 저밀도의 고염-고온수는 4월에는 나타나지 않아 고염수쪽의 수온이 낮아진 것을 알 수 있다. 가장 밀도가 큰 해수는 고온-고염수들이다.

수계의 종관적 분포

수온과 염분 관계도에서 구분된 수계들은 대마난류기원 고온수, 황해북부냉수 혹은 황해중앙냉수 그리고 남해저온수로 요약된다. 해면하 5 m에서의 수평분포도(Fig. 5)는 이 수계들의 지리적 분포를 보여준다. 관측시기와 무관하게 수계분포는 전선에 의해 뚜렷

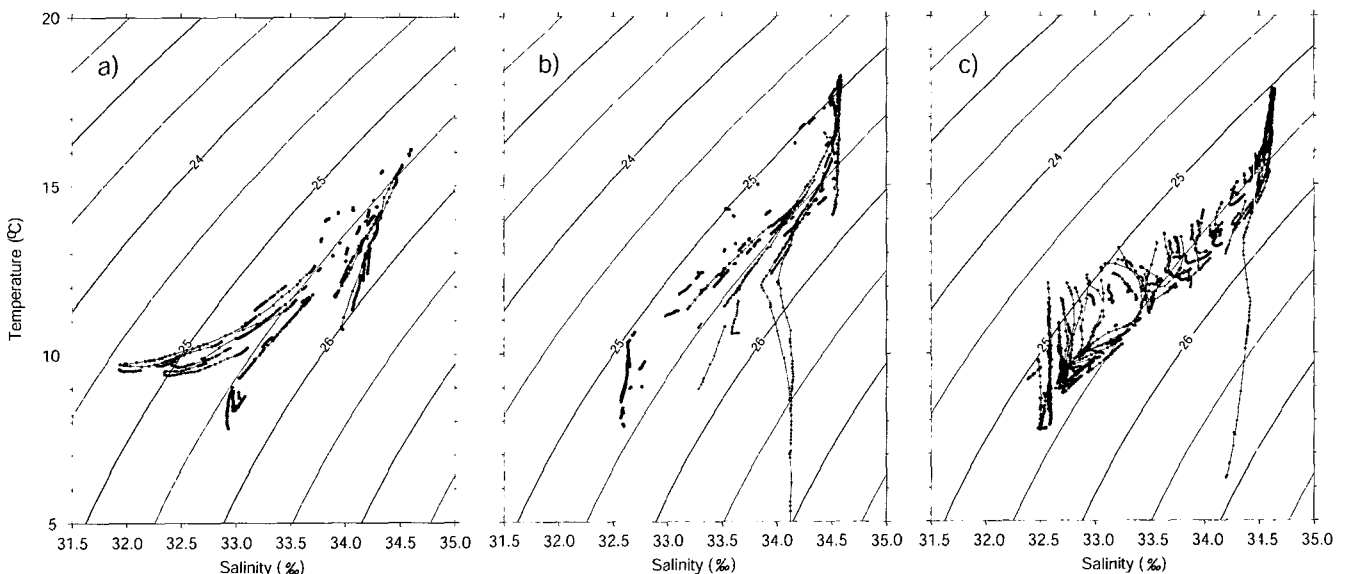


Fig. 4. Temperature-Salinity diagram obtained in February 1998 (a), and January (b) and April (c) 1999.

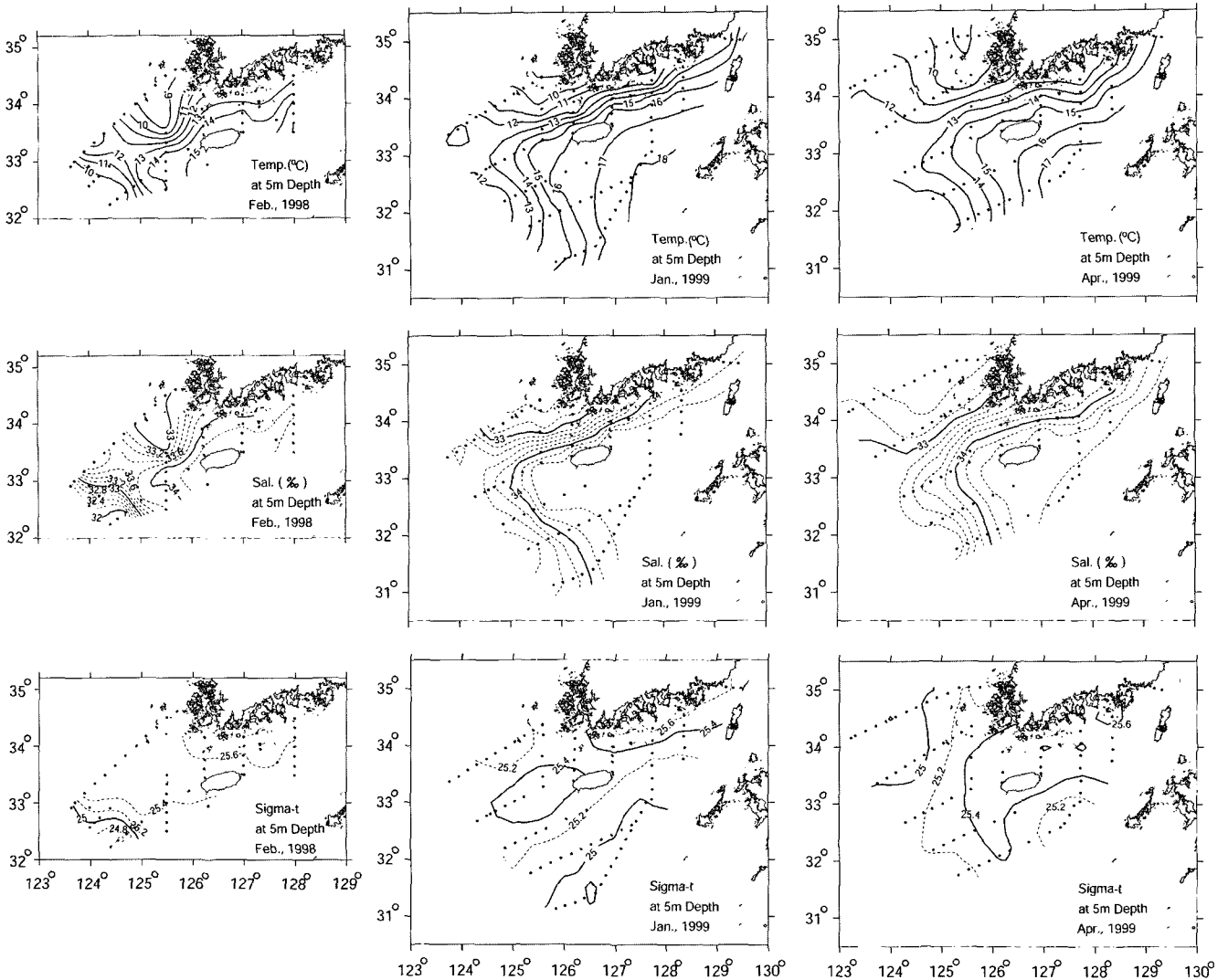


Fig. 5. Distributions of temperature, salinity and density at 5 m depth in February 1998 (left), and January (center) and April (right) 1999.

하게 구분되며 3개 지역으로 대표될 수 있다. 첫째, 대흑산도 남쪽에서(I 구역, Fig. 2참조) 상대적 저온(9°C 이하), 저염(33‰ 이하)의 황해중앙냉수와 대마난류기원 고온수 사이에 형성된 수온(9°C ~ 14°C)과 염분(33‰~34‰) 전선이다. 둘째, 양자천퇴 부근(II 구역)에서는 고온(13°C 이상), 고염(33.6‰ 이상)의 대마난류기원 고온수가 저온-저염수와 만나는 북서-동남 방향의 수온(10°C~13°C)과 염분전선(32‰~33.6‰)이다. 이 두 전선은 제주도 서쪽에서 연결되어 기본적으로 'Γ'자 형태를 이루고 있으며 Chen *et al.* (1994)이 보여준 동중국해에서의 'S'자 형태 전선의 북쪽 부분에 해당한다. 두 전선이 연결되는 해역에서는 수온과 염분구배가 현저히 약해지며 제주도 주변에서 고온고염수가 북서쪽 황해내부로 확장하는 분포를 보인다. 셋째로는 남해 연안의 저온-저염수와 외해의 대마난류기원 고온수사이에 형성된 전선(III 구역)이다.

관측해역 내 해저면에서의 특성분포를 살펴보면(Fig. 6), 1999년 1월에는 수온과 염분분포가 표층과 유사하지만 1998년 2월의 경우에는 전선의 강도와 특성이 표층과 뚜렷이 다르다. 양자강천퇴주변 전선에서는 저층수온과 염분이 표층보다 높으며 전선의

위치도 표층보다 남서쪽으로 옮겨졌고, 대흑산도 남쪽에서도 저층수온과 염분이 표층보다 높으며 전선의 세기가 현저히 약해졌다. 특히, 남해에서는 12°C 이하 34‰ 이하의 해수가 남동쪽으로 향하는 혀모양 분포를 이루고 주변 저층수와는 특성이 고립되어 있고, 가장 밀도가 높은 해수는 세 번의 관측에서 모두 남해연안에 분포한다. 1999년 4월에는 대흑산도 남서쪽 외해에서 저층수온이 표층보다 낮고 염분은 뚜렷이 높다.

인공위성에 의한 표층 수온분포에서도 기본적인 'S'자 형태 전선과 수계분포는 확인할 수 있으며(Fig. 11참조), 겨울철에 고온-고염의 대마난류수(제주난류수)가 제주도 남서쪽과 북쪽에서 전선에 의해 차단되고 있음을 보여준다. 이러한 특성분포로부터 대마난류에서 기원하는 황해난류가 한국 서해안을 따라 북상한다고 Uda(1934)가 제시한 순환체계는 겨울철에는 적용될 수 없음을 분명하며, 고온-고염수가 황해내부로의 유입 혹은 확장될 수 있는 유일한 통로는 제주도 북서쪽에서 'Γ'자 형태로 연결되어 전선의 구배가 약한 곳이다(Lie *et al.*, 2001). 고온-고염수가 황해내부로 확장하는 경우에도 수계의 특성은 전선역에서 크게 변하여 제주도

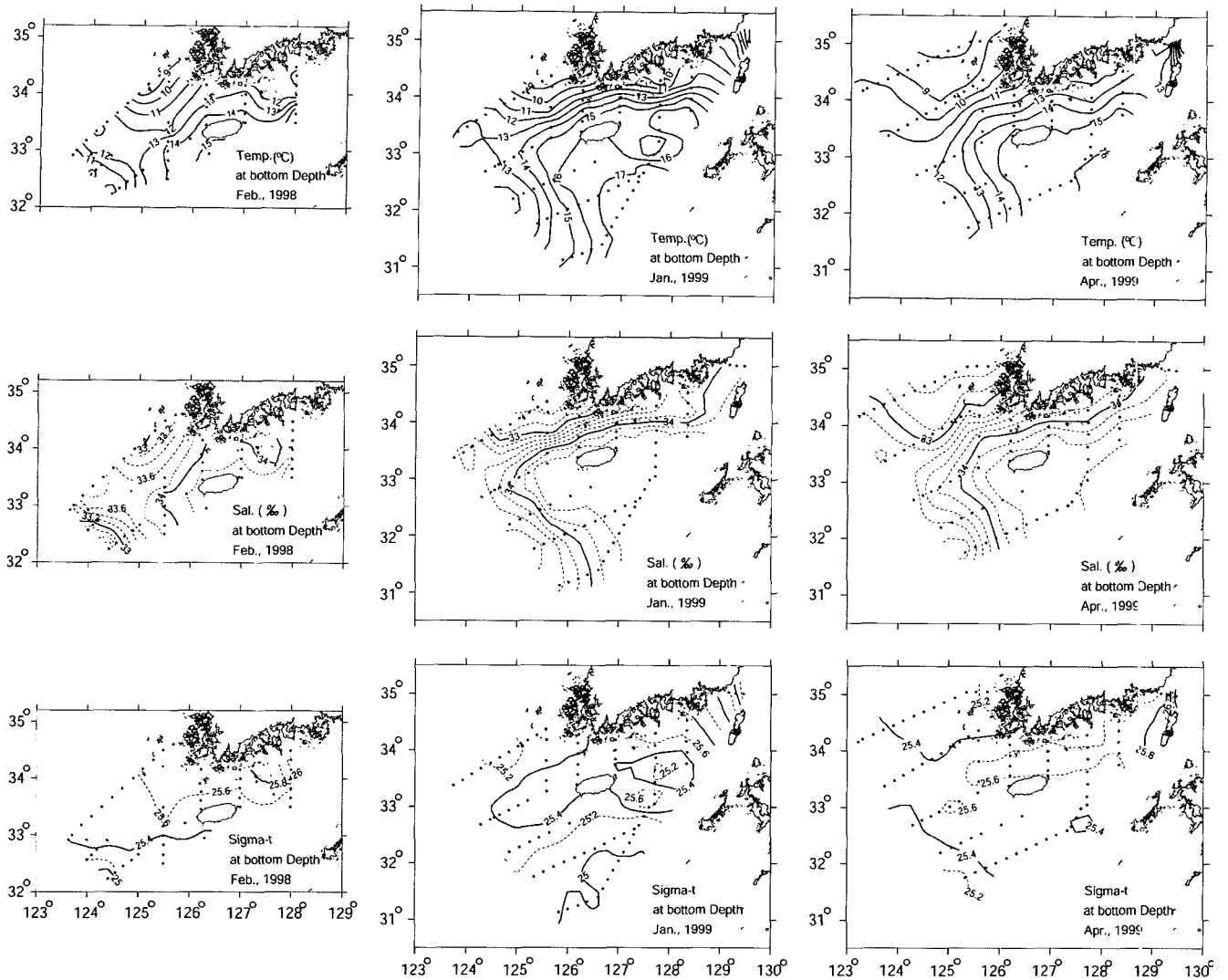


Fig. 6. Distributions of temperature, salinity and density at bottom in February 1998 (left), and January (center) and April (right) 1999.

주변의 고온-고염수와는 확연히 달라짐을 알 수 있다.

각 관측시기에 따라 다소 달라지는 전선분포 형태 그리고 황해 내부로 고온-고염수가 확장하는 세기 및 방향을 비교해 보면, 1998년 2월에는 대흑산도 남쪽에서 9°C 이하의 황해중앙냉수가 남쪽으로 확장하여 전선의 수온구배를 증가시키고 양자강 천퇴 주변에서는 32‰ 이하의 황해북부냉수가 난류수와 접하여 강한 밀도 전선을 형성하고 있다. 1999년 1월과 4월에는 양자강 천퇴주변에서 황해북부냉수가 관측되지 않았는데 이는 다소 축소된 관측구역 때문이거나 혹은 전선위치가 변화되었기 때문일 수 있다. 1월에는 대흑산도 남쪽 전선이 2월에 비해 동서방향으로 연장되며 전선북쪽에 저온-저염수의 범위가 넓어졌고 황해내부로 향하는 고온-고염수의 확장세기는 비슷하지만 확장방향이 서쪽(2월에 비해 반시계방향)으로 다소 변화되었다. 한편, 4월에는 한반도 남서단에서부터 염분전선이 1월과 2월에 비해 북쪽으로 이동되었고 황해내부에서 냉수가 남서쪽으로 더 넓게 확장되어 있어 'Γ'자 형태의 전선 모서리가 완만하게 변화되었으며 현재지 반시계방향으로

회전되어졌다. 이러한 관측 시기별 전선위치의 변화는 다음 장의 전선구조 수직단면에서도 확인된다.

전선구조

황해입구 해역(I 구역)

한국 남서연안으로부터 북동-남서 방향으로 향하는 단면들에서의 전선구조는 Fig. 7과 같다. 2월에는 대흑산도 쪽의 황해중앙냉수와 양자천퇴 쪽의 황해북부냉수는 황해내부로 확장하는 13°C 이상 33.7‰ 이상의 고온-고염수에 의해 전 수층에 걸쳐 분리되어 있다. 이 고온-고염수가 황해중앙냉수와 접하고 있는 소흑산도 남서쪽 전선은 수직으로 발달하였으며 밀도차이가 거의 없다. 하지만, 양자천퇴 쪽의 황해북부냉수와 고온-고염수가 접하는 전선에서는 밀도차이가 크고 전선이 수평방향으로 기울어져 수온의 역전구조를 보인다. 이 전선구조는 Fig. 9에서 자세히 논의할 것이다. 1999년 1월에는 2월의 경우보다 고온-고염수와 황해중앙냉수

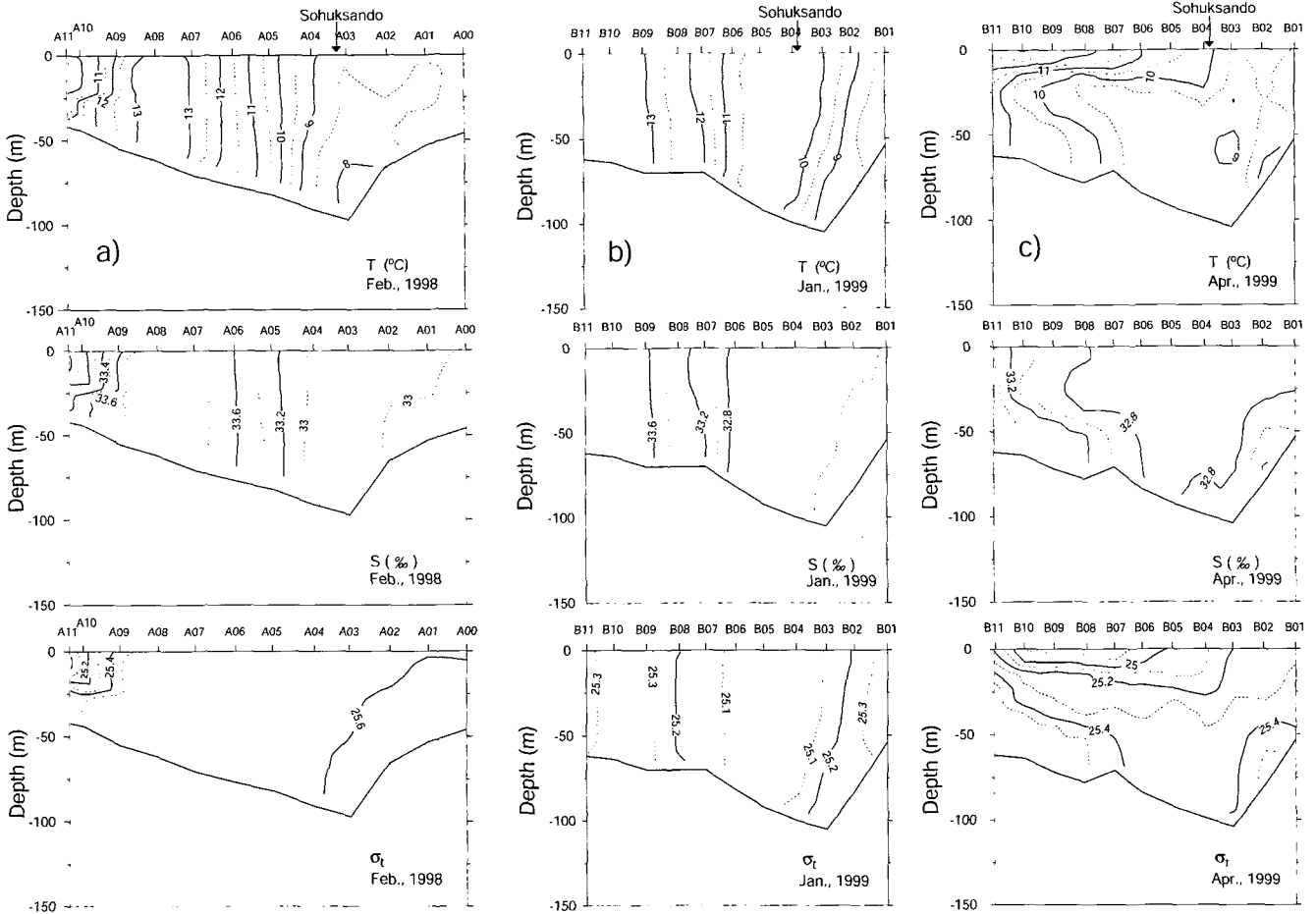


Fig. 7. Vertical sections of temperature, salinity and density along line A1 in February 1998 (a), and line B in January (b) and April (c) 1999 (see Fig. 2 locations).

사이의 열염전선이 약해졌지만 냉수의 염분이 0.4‰ 정도 감소하여 밀도구배가 증가하였고 두 수계 사이인 단면 중앙부(소흑산도 부근)의 낮은 밀도구역에 의해 열전선과 밀도전선이 두 곳으로 나누어져 있다.

4월의 단면구조는 1월과 2월에 비해 수직적으로 뚜렷이 성층된 구조를 보이는데 이 성층구조는 상대적으로 저온-저염의 특성을 갖는 소흑산도 주변 해수가 수심 약 20 m부터 50 m 깊이의 중층에서 양자천퇴 방향으로 관입되어 있는 구조에 의해 형성되었다. 수온단면의 관입구조는 북쪽에 위치한 단면 A의 정점 A10부터 A13에서도 관측되었다(Fig. 12참조). 이는 수온과 염분의 대규모적 역전현상으로서 황해쪽 냉수(10°C이하, 32.8‰)가 중층을 통하여 남쪽 혹은 남서쪽으로 이류, 공급된 결과로 보이지만 역전구조의 발생과정에 대해서는 저온수의 이류관입의 발생시기와 3월 이후의 표층열수지에 의한 수온상승 가능성 등에 따라 달라질 것이므로 종합적 해석이 필요하다. 이러한 저온수의 관입구조는 1월과 2월에 고온-고염수가 전 수층을 통하여 북서쪽 황해내부로 확장하던 현상이 4월에는 현저히 약화되며 확장하는 방향과 수층이 변경되었음을 의미한다.

대마난류기원 고온수와 황해중앙냉수가 접하는 전선을 남북방향으로 가로지르는 단면에서는(Fig. 8) 약한 밀도전선이 형성되어

있고 시기별로 전선의 위치가 변한다. 2월에는 전선이 북위 33°20'에 중심을 두며 전선북측 저층에서 수온역전을 보인다. A01 정점에서 밀도가 큰 점으로 보아 표층저온수가 남쪽으로 이류되어 수온역전현상이 형성되고 전선의 구배가 매우 강해진 것으로 해석된다. 1999년 1월에는 열염전선이 더욱 강해졌으며 2월에 비해 전선의 중심이 15해리 정도 북쪽으로 이동되어 있다. 하지만, 정점 C01은 B01과 같은 위치임에도 B 단면 관측 후 강한 북서풍으로 인해 정점 B01보다 약 56시간 후에 관측되었으며(Fig. 3b참조), C01이 B01보다 수온이 1°C 정도 낮아졌다(Fig. 7b, 1월 단면도 참조). 이러한 특성치의 시간적 변화는 관측기간 중에도 저온-저염수가 남쪽으로 이동되었음을 시사한다. 한편, 4월에는 수온과 염분전선이 2월에 비해 25해리 정도 북쪽으로 이동되었으며 전선이 다소 약해졌다. 전선역 남쪽에 저층에 밀도가 높은 고온-고염수가 위치하며 1월과 2월에 비해 수직성층이 증가하였다.

양자천퇴 동부(II 구역)

제주도에서 남서쪽 양자천퇴로 향하는 단면에서의 전선구조는 Fig. 9와 같다. 수심이 얇은 천퇴 위까지 단면이 연장되었던 1998년 2월에는 밀도가 낮은 저온-저염수가 천퇴부근 표층에서 관측되었다. 저층의 고온-고염수와 수온이 역전되었음에도 강한 수직

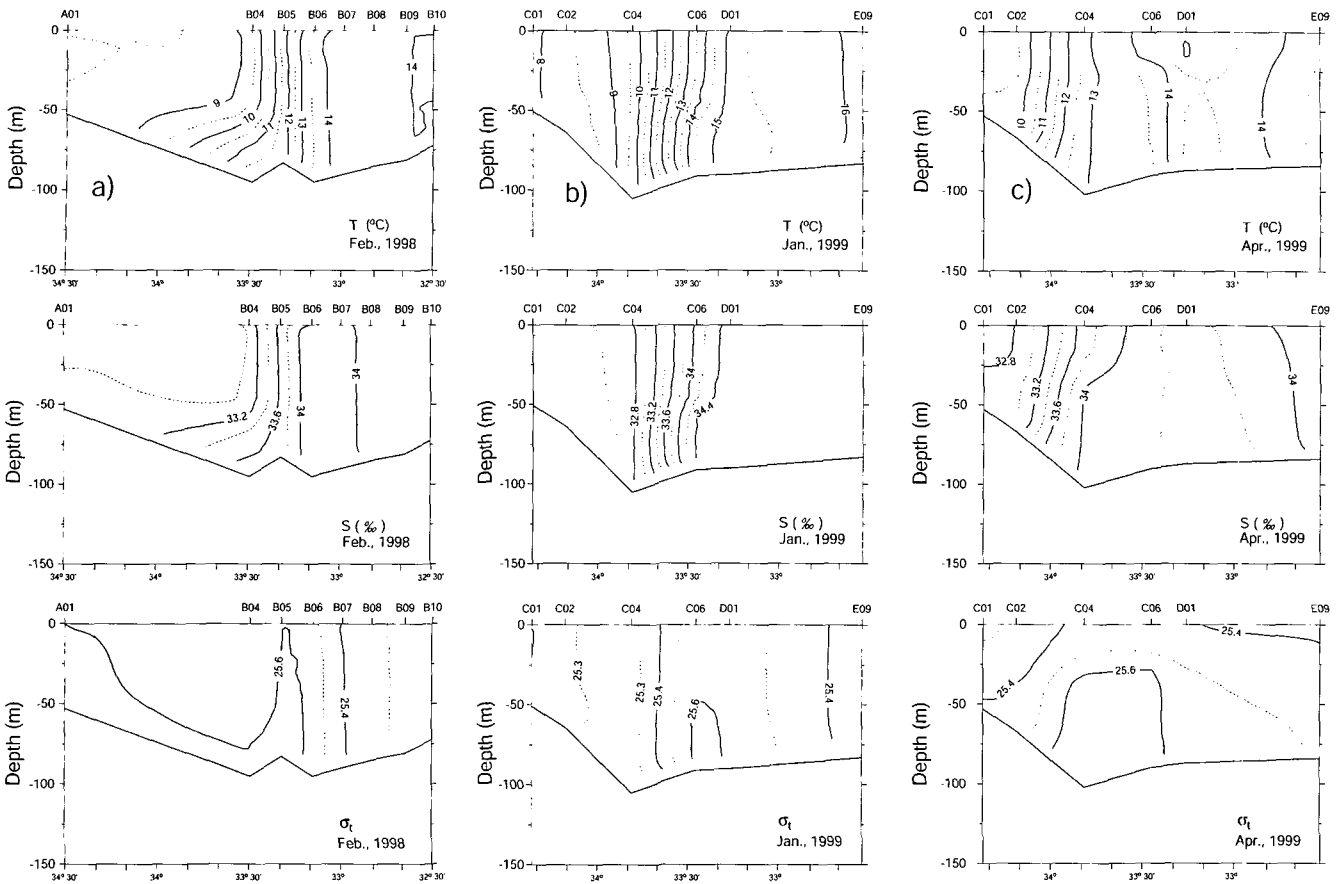


Fig. 8. Vertical sections of temperature, salinity and density along line B in February 1998 (a), and line C in January (b) and April (c) 1999 (see Fig. 2 locations).

성층을 이루고 이 전선이 표층으로 노출되며 기울어져 있다. 이러한 전선구조는 표층수가 바람 등의 외력에 의해 이루어지면서 저층수가 보류로서 수심이 얇은 쪽으로 관입되어 발생되었거나 혹은 인접한 두 수계의 큰 밀도차이에 의해 상하층이 상호 관입되면서 유지되는 지형류적 적응(geostrophic adjustment)에 의한 구조일 수 있다. 조류혼합이 강한 지역인 양자천퇴에서는 후자의 기작에 의해 전선구조가 장기간 유지되기는 어려울 것으로 판단되지만, 동시기에 대흑산도 남쪽으로 확장하는 황해중앙냉수(Fig. 5a, Fig. 8a참조)와 함께 바람에 의한 이류현상일 수 있으므로 두 가지 가능성이 대해 뒷장에서 논의할 것이다.

1999년 1월에는 2월과 같은 전선구조가 관측되지 않았으며 수직적으로 혼합된 고온수와 저온수가 약한 전선을 형성하고 있다. 두 수계의 특성차이가 밀도차이를 보상하여 밀도전선은 매우 약하다. 한편, 4월에는 2월과 유사한 수평적 특성차이를 갖는 전선이 형성되었으나 2월에 비해 13°C 이하의 저온수가 넓게 분포하며 저층수온이 현저히 낮아지고 염분도 낮아져 수직 밀도성층이 발달하였다. 저층에서는 수직적으로 잘 혼합된 구조를 보이지만 양자천퇴 쪽에서는 수평적인 염분차이에 의해 강한 밀도전선이 형성되어 있다. 동일 단면에서 4월의 저층수온이 1월에 비해 현저히 낮아진 현상과 함께 정점 D05 중층에서 12°C 미만의 저온수 핵구조가 관측된 것은 북쪽의 단면 B에서(Fig. 7c) 나

탄 대규모적 수온역전 현상이 이 지역까지 영향을 미치고 있음을 의미한다.

남해 연안역(III 구역)

남해 중앙부에 해당하는 단면의 수직구조는 Fig. 10과 같다. 1998년 2월에는 저온의 연안수가 외해쪽 고온수와 강한 전선을 형성하고 있으며, 밀도가 높은 12°C 이하의 저온수가 남해 연안의 저층 사면을 따라 침강하는 구조를 보이며 염분이 역전되어 있다. 북서-남동방향으로 관측된 인접한 단면에서도 저층을 따라 침강하는 구조를 이루며 11.5°C 이하의 낮은 수온이 관측되어 Fig. 6a에서 보는바와 같이 해저사면을 따라 저온수가 남동쪽으로 확장하는 분포를 보인다. 이 저온수는 34‰ 정도의 고염으로서 밀도가 높았다.

1999년 1월에 관측된 단면은 2월 단면보다 약 23 km 정도 서쪽이지만 연안수의 수온이 10°C 이하로 낮으며 염분역전을 보이는 연안수는 33.7‰ 이하로서 2월의 경우와 유사하게 저온-저염의 고밀도 연안수가 저층으로 침강되는 구조를 보여준다. 외해쪽 저층의 15°C 이하 저온수는 연안쪽 저온수와는 다른 고염의 해수이다. 4월에는 수온과 염분전선이 1월과 2월보다 현저히 약해졌으며 연안수의 침강구조는 나타나지 않았고, 전선의 중앙부에서 밀도가 높다.

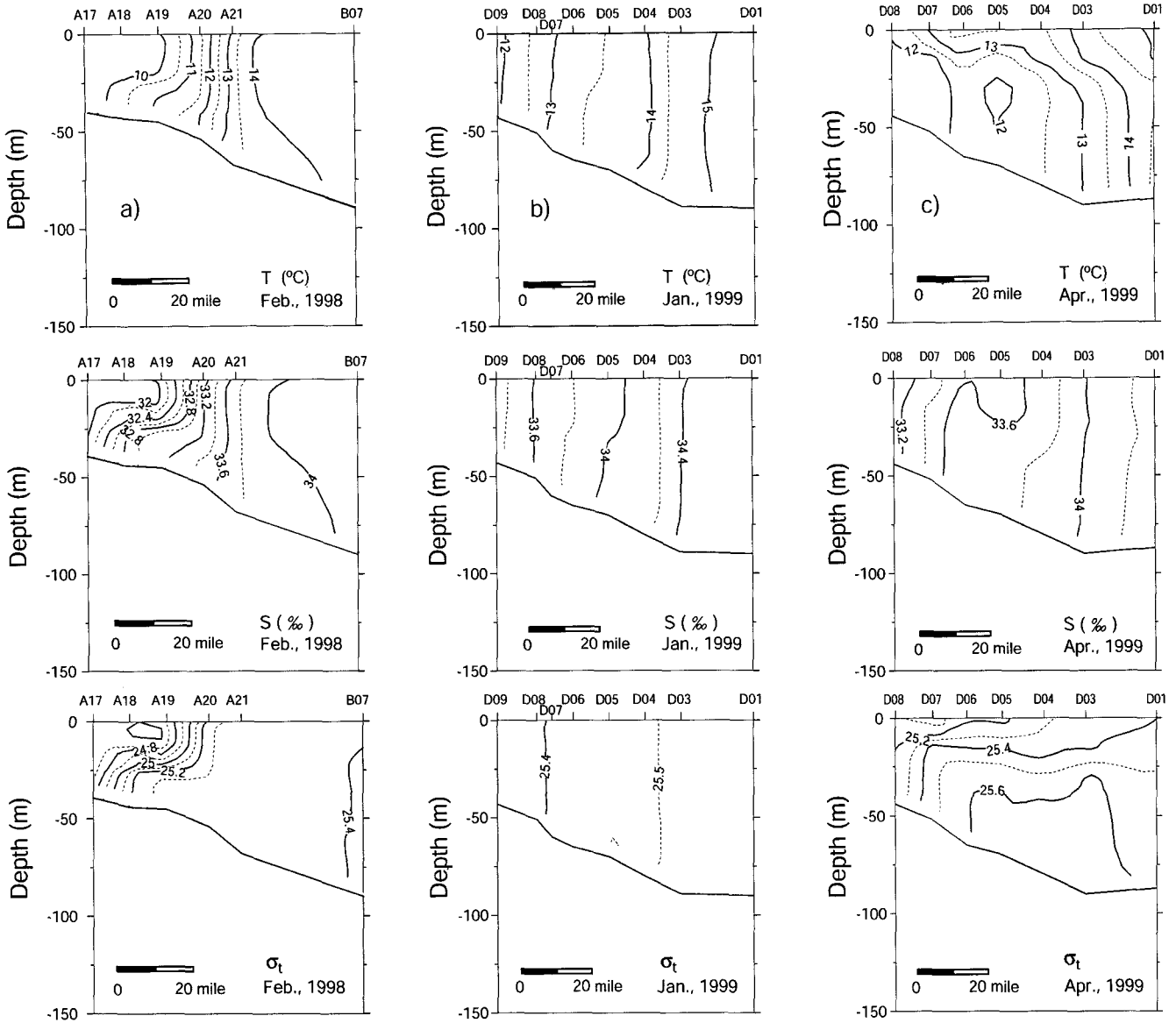


Fig. 9. Vertical sections of temperature, salinity and density along line A3 in February 1998 (a), and line D in January (b) and April (c) 1999 (see Fig. 2 locations).

토의 및 요약

3회의 관측에서 나타난 표층전선의 종관적 분포특성은 ‘S’자 형태의 일부로서 ‘Γ’자를 보였다(Fig. 5). 이러한 기본적인 전선분포가 겨울철에 유지되기 위해서는 제주도 서쪽을 우회하여 동쪽으로 흐르는 대마난류수(일명 제주난류수, Chang *et al.*, 2000)에 의한 고온-고염수의 공급과 황해내부에서 중국연안과 한반도 서해안을 따라 남쪽으로 이루어지는 저염의 냉수 공급이 전제되어야 하며 이와 더불어 두 수계의 공급을 유지하는 힘 혹은 흐름의 평형과 함께 두 수계의 밀도평형이 요구된다. Lie, *et al.*(2001)은 평형을 유지하는 흐름을 양자전위 사면을 따라 서로 반대방향으로 향하는 조석잔차류(Lee and Beardsley, 1999)와 제주난류로 보았다.

수치실험 연구(Park, 1986; Jacobs *et al.*, 2000; Riedlinger and

Jacobs, 2000))와 해류관측(Hsueh, 1988; Teague *et al.*, 2000; Lie *et al.*, 2001)에 의하면, 강한 북서계절풍에 의해 수심이 얇고 해안선 부근인 한반도 서해안과 중국연안에서는 주로 wind-drift 효과에 의한 순풍류가 발생하지만 수심이 깊은 황해 중부 및 남부에서는 순풍류와 더불어 Ekman 수송에 의해 형성되는 해면구배 및 내부 밀도차에 의한 압력경도력이 바람응력보다 우세할 때 간헐적으로 역풍류가 발생하여 고온-고염의 대마난류수를 황해내부로 이루시킬 수 있다. 이러한 기존 연구를 바탕으로 본 연구에서 관측된 시기별 전선분포의 변화와 지역별 전선구조의 차이가 주로 바람과 열수지에 의해 유발될 것으로 가정하여 전선의 변형과정을 설명하고자 한다.

1998년 2월 관측기간을 전후하여 획득된 위성영상 수온분포를 살펴보면(Fig. 11a), 관측시작보다 8일 이전인 12일에 제주도

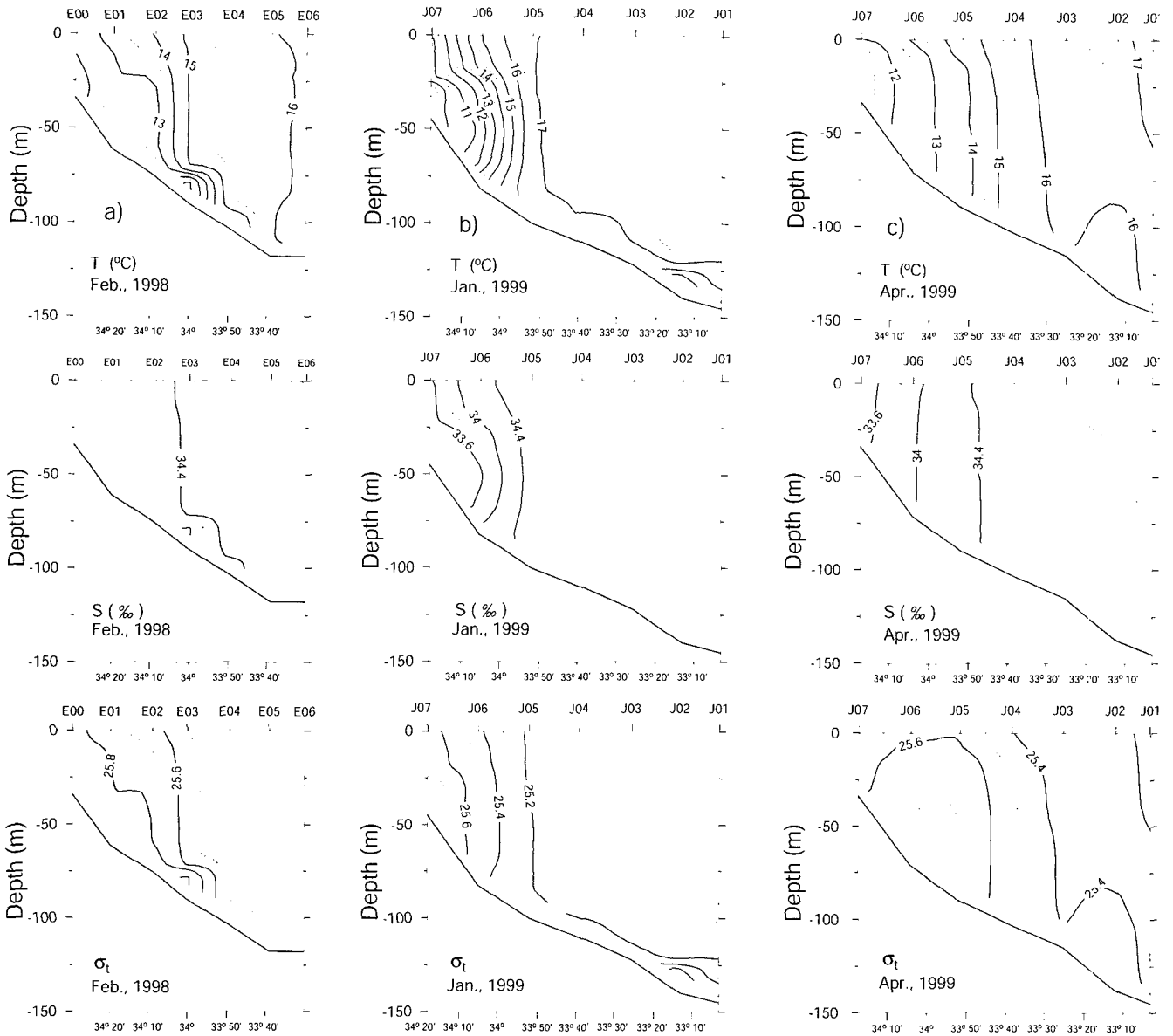


Fig. 10. Vertical sections of temperature, salinity and density along line E in February 1998 (a), and line J January (b) and April (c) 1999 (see Fig. 2 locations).

주변에 고온수 범위가 넓게 분포하며 북서쪽을 향하여 황해내부로 강하게 유입된 형태를 보이고 양자강 천퇴역에 수온전선이 강하게 나타났다. 하지만, 관측 후반부인 27일에는 수온이 전반적으로 낮아졌고 황해내부로 향하는 고온수의 범위가 남동쪽으로 축소되고 폭이 좁아졌으며, 대흑산도 남쪽에서 황해냉수의 남하가 뚜렷하고 양자강천퇴 주변의 수온도 낮아졌다. 제주해협 내에서는 상대적으로 고온수가 남해안까지 분포하고 있다. Fig 5a의 수온분포는 27일 위성영상과 유사하다.

관측된 전선분포와 위성영상 수온분포의 변화를 바람에 의한 순환과 수계이동으로 정성적인 해석을 해보면, 2월 12일의 위성영상에서 나타난 황해내부로의 고온수 확장은 남서풍에서 북풍으로 바뀐(시계방향) 강한 바람(Fig. 3a)에 의한 Ekman 수송으로 황

해내부와 대마난류수역 사이에 해면구배가 형성되고 이로 인해 발생한 역풍류의 결과로 해석할 수 있다. 한편, CTD 관측시작 4일 전부터의 강했던 북동 및 동풍은 해면구배를 완화하여 고온수가 황해내부로 확장되는 것을 후퇴시키지만 한반도 서해안에서는 순풍류에 의해 저온수가 남쪽과 서쪽으로 이동되었을 수 있다. 대흑산도 남쪽에서의 냉수남하(단면 B, Fig. 8a)현상이 북풍이 다소 강해졌던 시기에 관측되었던 것으로 미루어볼 때 순풍류에 의한 이류로 해석된다. 또한 관측초반에 불었던 남풍 및 동남풍은 한반도 서해안에는 큰 영향을 주지 못하지만 순풍류 혹은 Ekman 수송에 의해 저온-저염의 양자천퇴 주변 표층수와 제주해협 내 표층수를 북쪽 혹은 북동쪽으로 이동시킬 수 있다. 양자천퇴에서 수온역전을 보이는 강한 밀도차의 전선구조(단면 A3, Fig. 9a)는 바람이 매

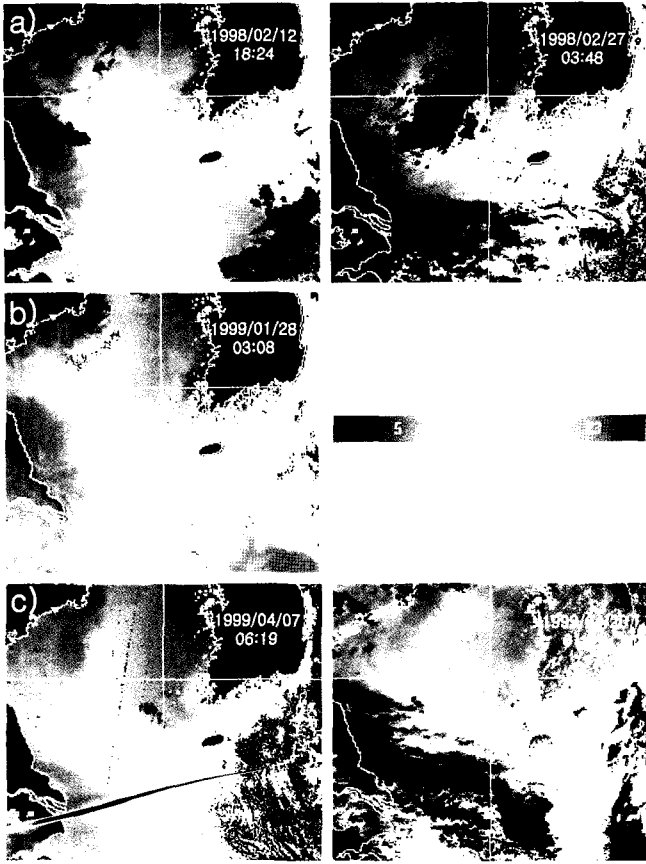


Fig. 11. Distributions of sea surface temperature using AVHRR image at local time in February 1998 (a), and January (b) and April (c) 1999.

우 약했던 시기에 관측된 점으로 보아 관측이전의 남-동풍에 의해 양자전위 위의 표층 저염-저온수가 북동쪽으로 이동되어 형성된 것으로 해석된다.

1999년 1월 CTD 관측에서(Fig. 5b) 한반도 남단 전선북쪽에 저온-저염수의 범위가 넓어졌고 황해 내부로 향하는 고온-고염수의 확장방향이 서쪽을 향한다. 이 시기에는 관측 초기인 28일의 위성영상만이 식별가능 하였으며(Fig. 11b) 위성영상에 의한 수온분포는 CTD 관측에 의한 종관적 수온분포와 유사하다. 제주도 북쪽 및 서쪽 단면 B, C, D 및 E를 관측하는 동안에 위성영상 없이 전선분포와 변화를 비교할 수는 없었지만, 일주일 정도의 기간동안에 북풍과 북서풍이 강하게 불었기 때문에(Fig. 3b) 순풍류에 의해 황해냉수가 남쪽으로 이동되고 또한 역풍류에 의해 고온수의 황해유입이 발생되었을 수 있다.

1999년 4월에는(Fig. 11c) 관측시작전인 7일과 관측 후반부인 20일의 위성영상에서 보이는 제주도 주변 수온전선분포가 비슷하며 두 시기 모두 북풍이 우세했음에도(Fig. 3c참조) 황해내부로 향하던 고온수 확장이 거의 보이지 않는다. 특히, 황해 동부와 대륙산도 및 소흑산도 서쪽의 넓은 구역에서는 4월 7일의 표층수온이 4월 20일보다 현저히 낮았다. 이주일 사이의 두 위성관측 수온분포는 Fig. 5c의 종관적 CTD 관측결과와 매우 유사한데, 이는 Fig. 5c에서 언급된 'T'자 형태 전선의 모서리가 완만하게 변화된 현상

및 전선분포가 반시계방향으로 회전되어진 현상이 오래도록 유지되고 있음을 의미한다. 1월에 비해 달라진 4월 전선분포의 변화기작과 Fig. 7c에서 보여진 수온 역전구조의 발생과정에 대해서는 4월 7일에 황해 동부 및 소흑산도 서쪽까지 넓게 나타난 표층저온수와 대륙산도에서 관측된 바람이 4월부터 남풍과 북풍으로 교대되는 변화에 단초를 두고 다음과 같은 설명이 가능하다.

황해 및 동중국해 북부해역에서 겨울철의 해수면을 통한 열수지는 일반적으로 3월 중·하순부터 열손실에서 열획득으로 변화되므로(봉, 1976; Lee, 1987; 강 등, 1994; 김, 1966) 수온은 3월 말에 가장 낮아지고 이후부터는 수온약층이 발달한다. 4월 중순에 관측된 황해남부 단면 A(Fig. 12)의 물성구조에서 수온약층의 발달을 볼 수 있다. 따라서 4월 7일의 위성영상에서 나타난 넓은 저온수 분포는 3월까지의 열손실과 북풍계열에 의한 순풍류가 황해

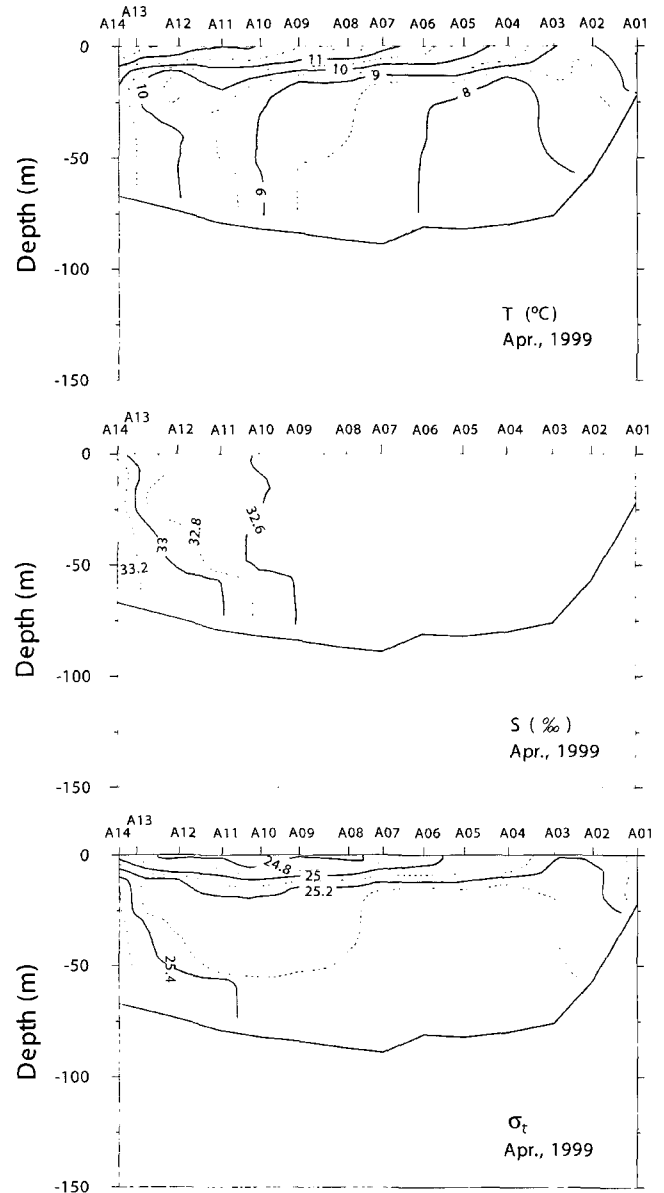


Fig. 12. Vertical sections of temperature, salinity and density along line A in April 1999 (see Fig. 2 locations).

의 저온수를 남쪽으로 넓게 확장시킨 결과로 해석함이 가능하다. 황해남부 단면 A와 B에서 형성된 수온약층이 4월 초순이후 표층에서의 열획득에 의한 것이라면 중층을 통한 저온수의 관입구조는 4월 7일의 위성영상에서 확인되는바와 같이 관측일인 4월 20일 이전에 남쪽으로 확장된 황해냉수이고 표층수가 4월 초순부터의 열획득에 의해 수온이 상승되어 나타난 것으로 해석할 수 있다.

한편, 단면 A와 B의 중층과 저층사이 수온역전에 대해서는 두 가지 해석이 가능하다. 첫 번째로 4월초에 황해냉수가 전 수층에 걸쳐 남하된 경우 단면 A와 B(Fig. 7c, Fig. 12)에서 보이는바와 같이 수심이 얇은 양자천퇴쪽 저층수가 밀도가 크기 때문에 고밀도수가 해지면 경사를 따라 중층의 저온수 아래로 관입되었을 수 있다. 두 번째로는 4월초에 황해냉수가 남하할 때 저층의 고밀도수 위로만 이동하였을 경우에도 수온 역전구조는 형성될 수 있다. 본 연구의 자료만으로는 수온 역전구조의 두 가지 발생과정을 구분할 수는 없다. 하지만 이(1992)가 1992년 4월에 북위 35°~36°사이와 동경 125° 부근 저층에서 관측한 수온역전 현상에 대해 저층을 통하여 북쪽으로 관입된 고온수에 의한 것임을 밝힌 바 있고, Lie et al.(2001)도 4월까지 50 m 수심에서 고온-고염수가 양자천퇴 동쪽 사면을 따라 황해로 유입되는 분포를 보고한 바에 비추어 보면 본 연구에서 관측된 4월의 수온역전구조도 첫 번째로 제시된 저층을 통한 고온수의 유입에 의해 발생되었을 가능성이 높다. 이러한 고온수의 저층을 통한 유입은 전선을 이루는 수계사이의 밀도차이에 의해 발생하는 기작으로서 1월과 2월에 역풍류에 의해 전 수층에 걸쳐 고온수가 유입되는 기작과는 달라진 현상이다. 특히, 고온수의 황해유입 과정의 변화는 겨울철에 발생하는 'Γ'자 전선의 모서리 형태가 변화되고 또한 표층 전선분포가 반시계방향으로 회전되어 나타나게 하는 원인으로 작용할 가능성도 내포한다.

남해 저온수는 Fig. 6a와 6b에서 보이는 바와 같이 주변해역과 연결되지 않는 특성치분포를 보이며 고립되어 있다. 이 저온수는 수심이 얇은 남해연안에서 1월과 2월경에 최저기온을 보이는 대기기에 의한 국지적인 열손실로 표층수가 냉각되어 Fig. 10에서 보이는 수직구조와 같이 침강하는 독립된 수계로 해석되어야 한다. Fig. 6a에서 보이는 남해저층 저온수의 분포방향은 서쪽에서 동쪽인 대한해협으로 흘러가는 동향의 대만류에 의한 것으로 해석할 수 있다. Fig. 10의 강한 밀도전선도 이러한 동향류의 존재를 뒷받침한다. 수심이 얇은 연안에서 해지면 경사를 따라 남쪽으로 침강하는 고밀도수는 이러한 동향류에 편승되어 동쪽으로 이동방향이 수정될 것이다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 동중국해 북부의 관측해역에서 수계들은 대만류기원 고온수, 황해북부냉수 혹은 황해중앙냉수 그리고 남해저온수로 분류된다. 황해와 접하는 해역에서 대흑산도쪽의 황해중앙냉수와 양자천퇴부근의 황해북부냉수는 제주도 서쪽을 우회하여 제주해협으로 유입하는 대만류기원 고온수와 'Γ'자 형태의 기본적 전선을 이룬다. 황해내부를 향하여 북서쪽으로 확장하는 고온-고염수의 세기에 따라 이 전선의 모서리 형태가 달라지며, 관측시기에 따라 양자천퇴 부근과 한반도 남서단 외측의 전선도 위치와 구조가 달라진다. 이러한 겨울철 전선분포와 전선구조가 변화되는 원인은 탁월풍에 의한 순풍류 및 역풍류, 해수면을 통한 열수지 그리고 전선사이의 밀도차이에 의한 것으로 해석되었다. 1월과 2월에 황해내부로 전 수층을 통해 고온-

고염수가 유입되고 한반도 남서단 외측으로 냉수가 남하하며 양자천퇴 주변에서 수온역전구조가 발생한 것은 순풍류와 역풍류에 의한 것으로 해석되었고, 4월에는 대만류기원 고온수가 밀도차이에 의해 양자천퇴 동측 사면을 따라 저층을 통해 황해내부로 유입되는 것으로 해석되었다. 남해 연안역에서 열염전선은 해안선에 평행하게 분포하고 있으며 관측해역에서 밀도가 큰 저온수가 남해 중앙부 연안에서 관측되었다. 연안 저온수는 수심이 얇은 연안역에서 표층 냉각으로 인해 국지적으로 형성된 독립된 수계가 침강하는 구조로 해석되었다.

사 사

본 연구는 한국 학술진흥재단이 지원하는 부경대학교 해양과학 공동연구소의 연구프로그램(KIOS-97-M-OIS)에 의해 지원되었으며, 자료분석과 논문완성은 한국과학재단이 지정한 군산대학교 새만금 환경연구센터(RRC, SERC)와 해양개발연구소(연구진흥사업)의 지원으로 진행되었다.

참고문헌

- 강인식, 김맹기, 심태보, 1994. 한반도주위 해양에서의 태면 열수지와 응력의 계절변화. 한국해양학회지, 29(4): 325-337.
- 공영, 1971. 한국 남해연안의 전선에 관한 연구. 한국해양학회지, 6(1): 25-36.
- 김구, 노홍길, 이상호, 1991. 하계 제주도 주변 수계와 순환. 한국해양학회지, 26: 262-271.
- 김영섭, 1996. 동지나해의 열속추정에 관한 연구. 한국수산학회지, 29(1): 84-91.
- 봉종현, 1976. 한국연안의 표면해수와 대기간의 열교환. 한국해양학회지, 11(2): 43-50.
- 이상호, 1992. 황해동부에서 4월에 관측된 수온역전. 한국해양학회지, 27(4): 259-267.
- 이흥재, 승영호, 1994. 한국 해양물리 연구의 현황과 발전: 문헌검토. 한국해양학회지, 29(1): 64-81.
- 승영호, 1992. 한반도 주변의 수괴와 해수순환. 한국해양학회지, 27(4): 324-331.
- Asaoka, O. and S. Moriyasu, 1966. On the circulation in the East China Sea and the Yellow Sea in winter (Preliminary Rep.). *Oceanogr. Mag.*, 8: 73-81.
- Beardsley, R.C. and R. Limeburner, 1983. Structure of the Changjiang River Plume in the East China Sea June, 1980. In: *Proceedings of the international symposium on sedimentation on the continental shelf with special reference to the East China Sea. April 12-16, 1983. Hangzhou, China.* Vol. 1. China Ocean Press. Jejing, 265-284.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu and G.A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Continental Shelf Res.* 4: 57-76.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Sea. *La mer*, 30: 297-314.
- Chang, K.-I., K. Kim, S.W. Lee and T.B. Shim, 1995. Hydrography and Sub-tidal current in the Cheju Strait in spring, 1983. *J.*

- Korean Soc. Oceanogr.*, **30**: 203–215.
- Chang, K.-I., M.-S. Suk, I.-C. Pang and W.J. Teague, 2000. Observations of the Cheju Current. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **35**(3): 129–152.
- Chen, C., R.C. Beardsley, R. Limeburner and K. Kim, 1994. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow Sea and East China Sea and adjacent Kuroshio during 1986. *Continental Shelf Res.*, **14**: 909–929.
- Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and Eastern China Sea. Rep. Korea Ocean Research and Development Inst. No. BSPI00019, 72 pp.
- Hsueh, Y., 1988. Recent current observations in the eastern Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, **93**: 6875–6884.
- Hsueh, Y. and D. Yuan, 1997. A numerical study of currents, heat advection, and sea-level fluctuations in the Yellow Sea in winter 1986. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**: 2313–2326.
- Jacobs, G.A., W.J. Teague, S.K. Riedlinger, R.H. Preller and J.P. Blaha, 1998. Sea surface height variations in the Yellow Sea and East China Sea, 2. SSH variability in the weekly and semiweekly bands. *J. Geophys. Res.*, **103**(C3): 18479–18496.
- Jacobs, G.A., H.B. Hur and S.K. Riedlinger, 2000. Yellow and East China Seas response to winds and currents. *J. Geophys. Res.*, **105**(C9): 21947–21968.
- Kim, K. and S.H. Lee, 1982. Vertically homogeneous water along the west coast of Jeju Island. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **17**: 59–68.
- 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*, ed. K. Takano. *Elsevier Oceanography Ser.* **54**: 253–267.
- Kondo, M., 1985. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea: Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50 m and near the bottom. *Bull. Seikai Regional Fish. Res. Lab.*, **62**: 19–66.
- Lee, H.C. and H.S. An, 1987. A Study on the Heat Budget in the South Eastern Area of the Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **22**(4): 217–227.
- Lee, J.-C., 1983. Characteristics of front near the Cheju Strait in early winter. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **16**: 51–58.
- Lee, J.-C., N. Y. Na and S. D. Chang, 1984. Thermohaline structure of the shelf front in the Korean Strait in early winter. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**: 153–162.
- Lee, S.H. and R.C. Beardsley, 1999. Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, **104**(7): 15679–15702.
- Lie, H.-J., 1985. Wintertime temperature-salinity characteristics in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea). *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**: 291–298.
- Lie, H.-J., 1989. Tidal fronts in the southern Hwanghae (Yellow Sea). *Continental Shelf Res.*, **9**: 527–546.
- Lie, H.-J., C.-H. Cho, J.-H. Lee, P. Niiler and J.-H. Hu, 1998. Separation of the Kuroshio and its penetration onto continental shelf west of Kyushu. *J. Geophys. Res.*, **103**: 2963–2976.
- Lie, H.-J., C.-H. Cho, J.-H. Lee and S. Lee, 2001. Does the Yellow Sea Warm Current really exist as a persistent mean flow? *J. Geophys. Res.*, **106**(C10): 22199–22210.
- Lim, D.B., 1976. The movement of the waters off the south coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **9**: 527–546.
- Nakao, T. 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Fac. Mar. Sci. Technol. Tokai Univ.*, Spec. No., 199–367.
- Odamaki, M., 1989. Tides and tidal currents in the Tusima Strait. *J. Oceanol. Soc. Japan*, **45**: 65–82.
- Park, Y.-H., 1985. Some important summer oceanographic phenomena in the East China Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **20**: 12–21.
- Park, Y.-H. 1986a. A simple theoretical model for the upwind flow in the southern Yellow Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **21**: 203–210.
- Park, Y.-H., 1986b. Water characteristics and movements of the Yellow Sea Warm Current in summer. *Prog. Oceanogr.*, **17**: 243–254.
- Riedlinger, S.K. and G.A. Jacobs, 2000. Study of the dynamics of wind-driven transports into the Yellow Sea during winter. *J. Geophys. Res.*, **105**(C12): 28695–28708.
- Suk, M.-S., G.H. Hong, C.S. Chung, K.-I. Chang and D.J. Kang, 1966. Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 55–63.
- Teague, W.J. and G.A. Jacobs, 2000. Current observations on the development of the Yellow Sea Warm Current. *J. Geophys. Res.*, **105**(C2): 3401–3411.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932 (in Japanese), *J. Imp. Fish. Exp. St.*, **5**: 138–190.

2003년 7월 28 원고접수

2003년 8월 22일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학