

Original Article

하계 한국 남해연안에 출현하는 수괴의 변동 특성

이문옥^{1,†} · 이수화¹ · 김평주² · 김병국³

¹전남대학교 조선해양공학과

²(주)엔비스

³(주)한국가스공사

Characteristics of Water Masses and its Distributions in the Southern Coastal Waters of Korea in Summer

Moon Ock Lee^{1,†}, Su-Hwa Lee¹, Pyeong Joo Kim², and Byeong Kuk Kim³

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

²ENVIS Co., Gunpo 15887, Korea

³Korea Gas Corporation, Daegu 41062, Korea

요 약

본 연구에서는 1997년부터 2014년까지 18년간 우리나라 남해안의 278개 정점에서 하계(8월)에 관측된 수온 및 염분자료(http://www.meis.go.kr)를 이용하여 수괴 분포와 그 물리적 특성을 파악하였다. 조사기간 중 표층의 평균수온은 다소 상승하는 추세를 나타낸 반면, 저층의 평균수온은 전체적으로는 하강하는 추세를 나타내었다. 또한 한국남해 연안수가 그 세력을 확장하여 외해를 흐르는 고온의 쓰시마난류수계와의 사이에 대략 25 °C를 전후한 수온전선을 형성하는 모습이 자주 출현하였다. 반면, 염분은 표층과 저층 모두 전반적으로 해가 갈수록 점차 상승하는 경향을 나타내었다. T-S diagram에 의한 수괴분석결과, 표층수는 고온·저염으로, 저온·고염의 저층수에 비해 상대적으로 밀도가 낮았다. 그러나 해에 따라서는 표층수와 저층수간에는 성층이 강화되거나 혼합(mixing)이 증가하였다. 클러스터 분석에 의한 수괴분포의 검토 결과, 표층의 경우, 연안역은 외양역에 비하여 상대적으로 저온·저염의 경우가 많았다. 또한, 해에 따라서는 연안역과 외양역 사이에 뚜렷하지는 않으나 밀도전선을 형성하고 있는 것으로 판단되었다. 반면, 저층의 경우는, 연안역은 저온·저염수가, 외양역은 저온·고염수가 출현하는 경우가 우세하였다. 또한, 조사기간 동안 남해안 서부해역과 제주해협 사이, 중부 연안역과 외양역 사이, 동부해역 등에서 물리적으로 서로 다른 3-4개의 수괴가 출현하는 것으로 판단되었다.

Abstract – We investigated the distributions and physical characteristics of water masses appearing in the southern coastal waters of Korea in summer. For our study, we used the data of water temperature and salinity that National Institute of Fisheries Science (NIFS) and Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM) gathered from 1997 to 2014. During the period of the investigation, the surface mean water temperature had a tendency to increase while the bottom one had a tendency to decrease. On the contrary, the mean salinity tended to gradually increase at both of the surface and bottom layers. T-S diagrams proved that the surface water had high temperature and low salinity, compared to the bottom water of low temperature and high salinity. However, stratification or mixing was found between the surface and bottom layers in accordance with years. The results of a cluster analysis indicated that the surface coastal areas often appeared to be low temperature and low salinity compared to the outer seas. In addition, in some years, thermohaline fronts were established between the coastal areas and the outer seas even though they were not significant. On the contrary, the bottom coastal areas often appeared to be low temperature and low salinity while the outer seas appeared to be low temperature and high salinity. Consequently, we could notice that three or four water masses almost regularly appeared between the western part and Jeju Strait, the middle coastal areas and the outer seas, and the eastern part of the southern coastal waters in summer.

Keywords: Water masses(수괴), T-S Diagram(수온-염분도), Cluster analysis(클러스터분석), Densimetric front(밀도전선), Yangtze River(양쯔강)

[†]Corresponding author: leemo@jnu.ac.kr

1. 서론

우리나라 남해안은 크고 작은 만과 200여개의 도서로 이루어진 매우 복잡한 지형을 가진 리아스식 해안으로 이루어져 있어서 유동 구조 또한 복잡할 것으로 생각된다. Ju[2011]에 따르면, 남해안의 해안선의 길이는 약 8,416 km이고, 해저경사는 수심 100 m 내외로 대체로 평탄한 것으로 알려져 있고, 특히 하계에는 낙동강을 비롯한 섬진강, 영산강 등으로부터의 하천수의 유입에 더하여 동부해역에서 서부해역으로 갈수록 점차 증가하는 조석 간의 차로 인하여 흐름 환경은 더욱 변화가 클 것으로 예상된다(Kwon and Kang[2007]).

한편, 남해연안수는 서쪽으로 황해, 남쪽으로 동중국해, 동쪽으로는 동해와 연결되어 있어서 이들 해역 고유의 특성을 갖는 다른 수괴와의 상호 작용에 의한 영향을 강하게 받고 있다(Yoon[2015]). 그 결과, 외해수와와 원활한 해수유동과 육수 유입에 의한 영양염류의 공급으로 종의 풍도와 다양성이 유지되어 한 마디로 남해안은 수산학적인 관점에서 매우 중요한 위치를 점하고 있다(Cho *et al.*[2007]). 또한 Lee and Choi[2009]는 하계에 한국 남해안이 제주해협 및 대한해협을 통과하는 쓰시마 난류(Tsushima Warm Current, 이하 TWC로 정의함)를 비롯하여 중국대륙 연안수(China Coastal Water, 이하 CCW로 정의함) 또는 양쯔강 유출수(Yangtze River Water, 이하 YRW로 정의함), 한국 남해 연안수(Korea Southern Coastal Water, 이하 KSCW로 정의함) 등에 의해 열염전선(thermohaline front)이 형성된다고 하였고, O *et al.*[2007]은 쓰시마난류와 황해 난류, 남해연안수 및 황해 냉수 등에 의해 밀도전선이 형성되어 수평적으로 수괴 분포나 배치 구조가 달라진다고 주장하였다. 특히, O and Seo[2006]는 하계에 양쯔강 등의 중국 하천수의 유입으로 중국대륙연안수가 우리나라까지 확장하여 영향을 미친다고 하였다.

양쯔강(Yangtze River)은 중국 칭하이(靑海) 지방에서 발원하여 약 6,300 km의 유로를 따라 남하하여 우리나라 서쪽의 황해로 유입하는 하천으로서, 그 연 평균 유량은 약 $9,616 \times 10^{10} \text{m}^3$ (황허강 유량의 약 10배)인 거대한 하천이다. 따라서 양쯔강의 하천수가 우리나라 남해안에 미치는 영향은 특히 하계에는 결코 무시할 수 없을 것으로 생각된다. Kuang *et al.*[2017]은 양쯔강의 장기간(1950-2011)에 걸친 월별하천유량의 변동이 하구에서의 해수면의 변동을 일으키며, 그 탁월 주기는 중국 연안에서의 주요 조석성분의 18.6년 주기와 일치한다고 주장하였다. 이것은 양쯔강 연안에서의 해수면 변화주기가 주로 조석에 의해 제어되고 있음을 의미한다. Sun *et al.*[2009]은 양쯔강의 담수유출이 하구의 염분과 하구시스템에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 그들은 양쯔강 하구의 저서생물의 환경에 필요한 하천유량의 값을 산정하였다. Wang *et al.*[2015]은 과거 40년(1970-2013) 동안, 주로 인간활동으로 인하여 양쯔강 유역으로의 질소와 인의 유입이 각각 3배, 306배가 증가하였음을 지적하였다. 또한, 이로 인해 적조와 저층에서의 빈산소 현상이 동중국해(ECS)의 양쯔강의 유출지역에서 관측되었다고 주

장하였다. 그 결과, 인간기원으로 인하여 풍부해진 영양염 유입이 하천유래의 DIN과 DIP의 유입을 탁월하게 하였고 Chl-a의 농도뿐만 아니라 하구 저층에서의 DO농도에도 영향을 미쳤다고 하였다. Zhao *et al.*[2015]는 양쯔강 상류에 건설된 초대형 삼협댐(Three Gorges)이 퇴적물(PES)의 하천 지역에 미치는 장기간의 효과를 조사하였다. 특히, 그들은 용존무기인(DIP)과 현탁입자성물질(SPM)의 농도가 댐의 설치로 인하여 향후에는 현저히 줄어들 것으로 예측하였다. 또한, O *et al.*[2007]은 황해 저층냉수가 확장한 결과 제주도 해협과 거문도 인근해역에까지 저층 냉수괴가 출현한다고 주장하였고, Kong[1971]은 남해연안에서 고온-고염(수온 28.5 °C, 염분 30.4 psu)의 대마난류수와 고밀도의 남해연안수가 서로 만나 밀도전선을 형성한다고 각각 주장하였다. 따라서 하계 우리나라 남해안은 다양한 물리적 특성을 가진 이들 수괴가 만나 해양 환경적 관점에서 매우 흥미로운 현상을 일으킬 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구는 지난 18년간(1997-2014) 우리나라 남해안의 하계에 출현한 수괴(또는 밀도전선)의 시간적, 공간적 변동 특성을 파악하기 위해 수행되었다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 서쪽의 함평에서부터 동쪽의 울산에 이르는 우리나라 남해안의 서부에서 동부에 이르는 전 연안 해역(붉은 실선으로 표시된 영역 내)을 대상으로 하였다.

본 연구에서는 국가해양환경정보통합시스템 (MEIS) (<http://www.meis.go.kr>)에 공개되어 있는 자료 중, 이 해역내의 연안역에서 해양환경관리공단(KOEM) (<http://www.koem.or.kr>)이 1997년부터 매년 계절별로 231개 정점에서 관측한 하계(8월)의 수온과 염분, 그리고 국립수산과학원(NIFS) (<http://www.nifs.go.kr>)이 47개 정점에서 정기관측한 하계(8월)의 수온과 염분을 각각 참고하였다. 따라서 연구대상해역내의 정점 수는 총 278개이다. 또한, 하계의 수온 및 염분에 영향을 미치는 육수 유입을 파악하기 위해 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) (<http://www.wamis.go.kr>)에 공개된 하천유량자료와 양쯔강 유량자료(Liu and Shen[2011])를 각각 참고하였다.

2.2 방법

먼저, 1997년부터 2014년까지 18개년에 걸쳐 상기한 우리나라 남해안 278개 정점에서 관측된 수온과 염분 값을 사용하여 수온 및 염분의 수평 분포도를 작성하고 수괴(또는 밀도전선)의 연도별 공간적 분포를 파악하였다. 다음으로, 이들 정점에서 관측된 수온과 염분 값을 사용하여 수괴분석을 실시하였다. 수괴분석에는 T-S diagram에 의한 방법과, SPSS패키지를 활용한 클러스터분석이 사용되었다. 이러한 수괴분석에 따른 수괴의 시간적, 공간적 분포나 변화의 판단에는 하천유량 등의 자료를 활용하였다. 연구해역인 남해안을 서부, 중부 및 동부해역으로 나눌 경우 이들 각각의 해역에

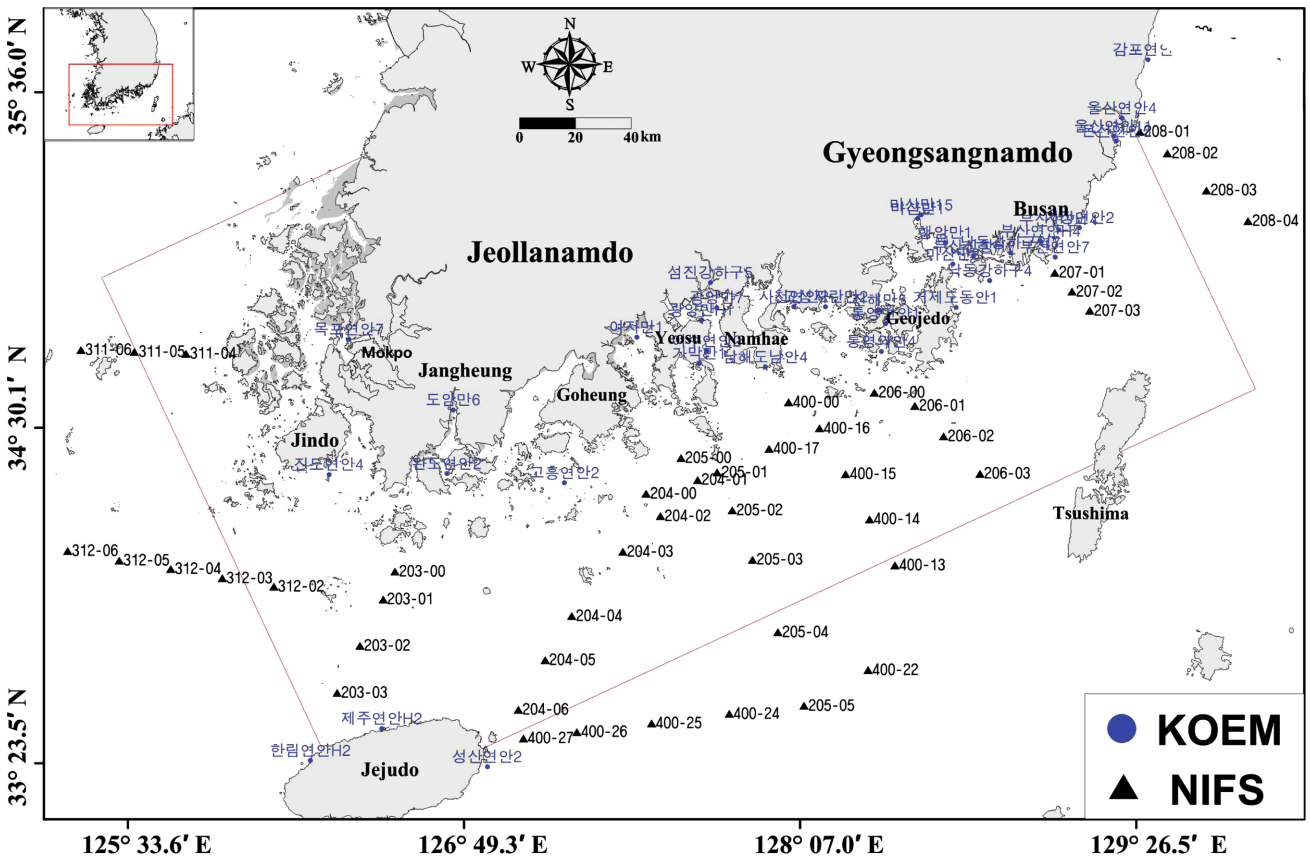


Fig. 1. Study area and oceanographic stations (KHOA) (<http://www.khoa.go.kr/khoa/pgmctrl/selectDictionary>).

직접 영향을 미칠 것으로 예상되는 영산강, 섬진강 및 낙동강의 유량과 염분변화와의 관계를 검토하였다.

2.2.1 T-S diagram에 의한 수괴분석

29개 정점에서 관측된 정선해양관측자료의 수온 및 염분 값을 사용하여 T-S diagram을 작성하고 수평적으로 물리적 성질(즉, 밀도)이 서로 다른 수괴(또는 밀도전선)가 존재하는지의 여부와, 또는 연직적으로(즉, 표층과 저층 간) 성층이 존재하는지의 여부를 판단하였다.

2.2.2 클러스터분석(cluster analysis)에 의한 수괴분석

상기한 29개 정점에서 관측된 정선해양관측자료를 포함한 47개 정점의 수온과 염분 값을 사용하여 클러스터분석을 행하였다.

클러스터는 무리 또는 덩어리의 의미를 가지는데, 자료나 변수가 많으면, 그 중에서는 반드시 서로 유사한 것이 포함되어 있다. 따라서 클러스터 분석이란, 이와 같이 다수의 자료와 변수가 있는 경우, 닳은 자료 또는 닳은 변수를 정리하는 것에 의해 전체의 경향을 파악하기 쉽게 하는 하나의 수단이다. 특히, 클러스터 분석에서는 유사성의 척도로서, 거리라고 하는 개념을 사용하는데, 이것은 개체나 변수가 서로 어느 정도 떨어져 있는가 또는 개체와 변수가 서로 어느 정도 닳아 있지 않음을 나타낸다.

본 연구에서는 Nagata and Munechika[2001] 및 Katatani and Matsuo[2006]에 의한 클러스터분석의 예를 따라 수온 및 염분에 의한 수괴분석을 실시하였다. 이를 위해 본 연구에서는 SPSS 통계

분석 프로그램에서 수온 및 염분 값을 표준화한 후 클러스터분석을 행하였고, 또한 클러스터 상호간 또는 클러스터와 단일의 개체 사이의 거리는 유클리드안 거리로서 정의한 최장거리법을 채택하였다. 클러스터 분석에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 거리측정법의 하나인 유클리드안 거리는 다음 식으로 표현된다.

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - x_{kj})^2} \tag{1}$$

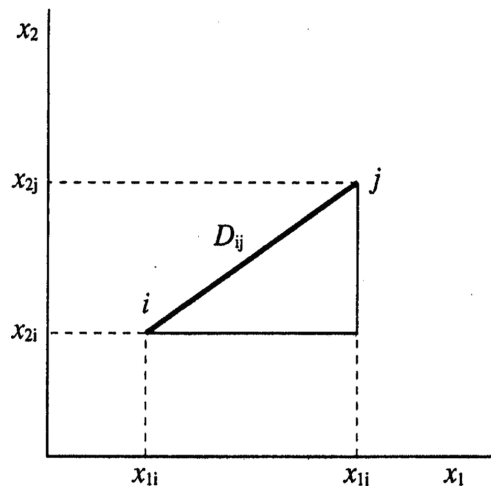


Fig. 2. Euclidian distance.

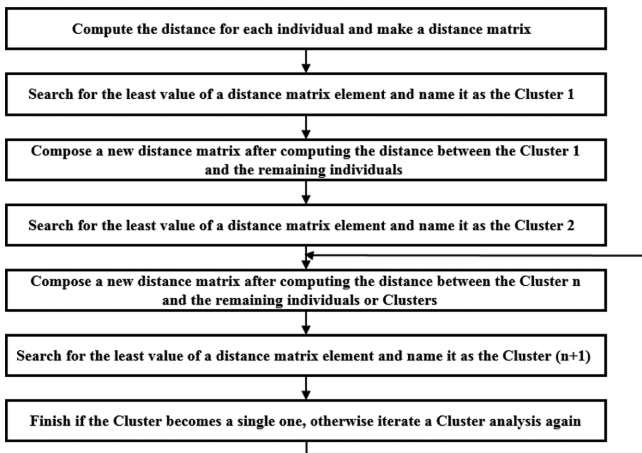


Fig. 3. Sequence of cluster analysis.

여기서 D_{ij} 는 개체 i 와 개체 j 의 사이의 거리, x 는 변수, k 는 변수의 번호이다. 두 변수의 경우를 예로 들면, Fig. 2와 같다. 요컨대 Fig. 3는 삼평방의 정리(피타고라스의 정리)에 의해, 사변(斜邊)의 길이를 구하는 경우와 동일하다. 평방근을 취하지 않고, 제곱한 채로 나타내는 것도 있으며, 그 경우는 유클리디안 평방거리라고 불린다.

한편, Fig. 3은 클러스터 분석의 순서를 나타낸다. 여기서는 분석 도중에 나오는 클러스터 상호간, 또는 클러스터와 단일의 개체 사이의 거리를 어떻게 구할까가 문제가 된다. 클러스터 중에는 두 개 이상의 개체가 포함되어 있는데, 거기서부터 다른 클러스터까지의 거리를 구할 때, 어디를 거리의 기점으로 할까가 문제가 된다. 여기에는 최단거리법, 최장거리법, 중심법, 균평균법, 워드법 등이 있으나, 본 연구에서는 최장거리법을 채택하였다.

최장거리법은 Fig. 4에 나타난 바와 같이, 클러스터에 포함된 개체 중, 상대측의 클러스터 또는 개체에 대하여 가장 먼 위치에 있는 개체로부터의 거리를 측정하는 방법이다.

한편, 클러스터의 형성 과정을 나타내기 위하여 덴드로그램

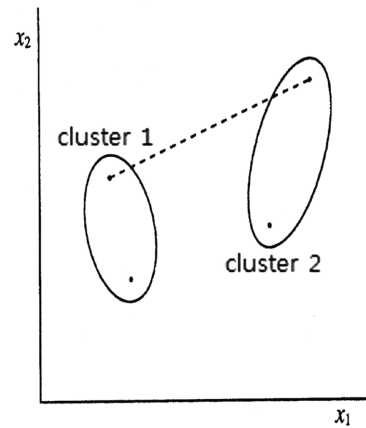


Fig. 4. Distance between clusters by the longest distance method.

(dendrogram, 樹形圖)을 사용하는 경우가 많다. 덴드로그램은 종축에 거리를 취하고 횡축에 대상을 등간격으로 나열하여 통합된 대상 또는 클러스터를 통합시의 거리의 높이로 묶은 것을 말한다.

여기서, 덴드로그램을 임의의 거리로 절단하면, 몇 개의 그룹으로 나눌 수가 있다. 따라서, 클러스터 분석에서 클러스터의 형성은 거리라고 하는 객관적인 지표로 행해지지만, 몇 개의 그룹으로 나눌 것인가와 그들의 특징은 무엇인가에 대해서는 해석자의 의도가 들어간다.

본 연구에서는 SPSS 통계분석 프로그램에서 수온 및 염분 값을 표준화한 후 클러스터분석을 실시하였으며, 또한 클러스터 상호간 또는 클러스터와 단일의 개체 사이의 거리는 유클리디안 거리로서, 최장거리법을 채택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수온분포

Fig. 5은 자료 및 방법에서 기술한 바와 같이 조사기간(1997-2014) 동안 한국 남해연안 278개 정점에서 매년 8월 표층과 저층

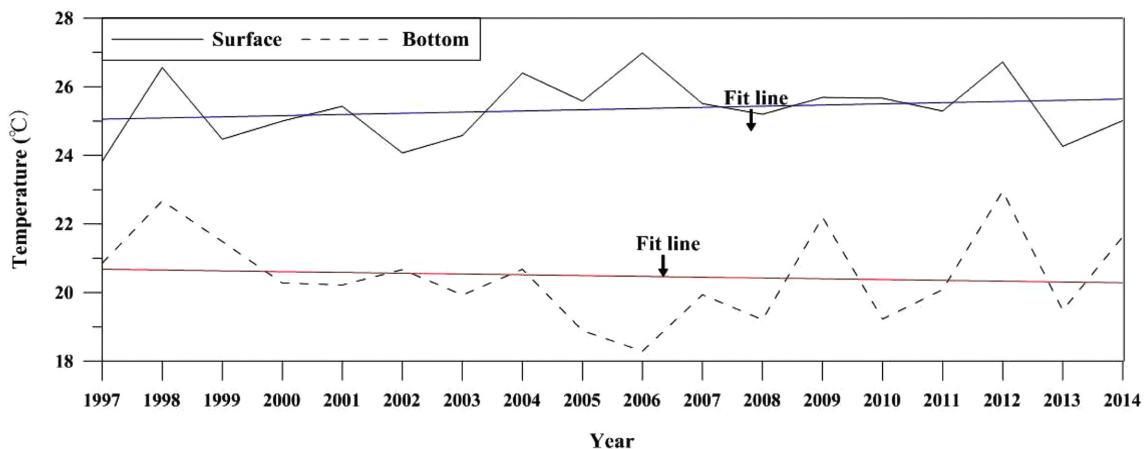


Fig. 5. Mean water temperature at the surface and bottom layers for each year.

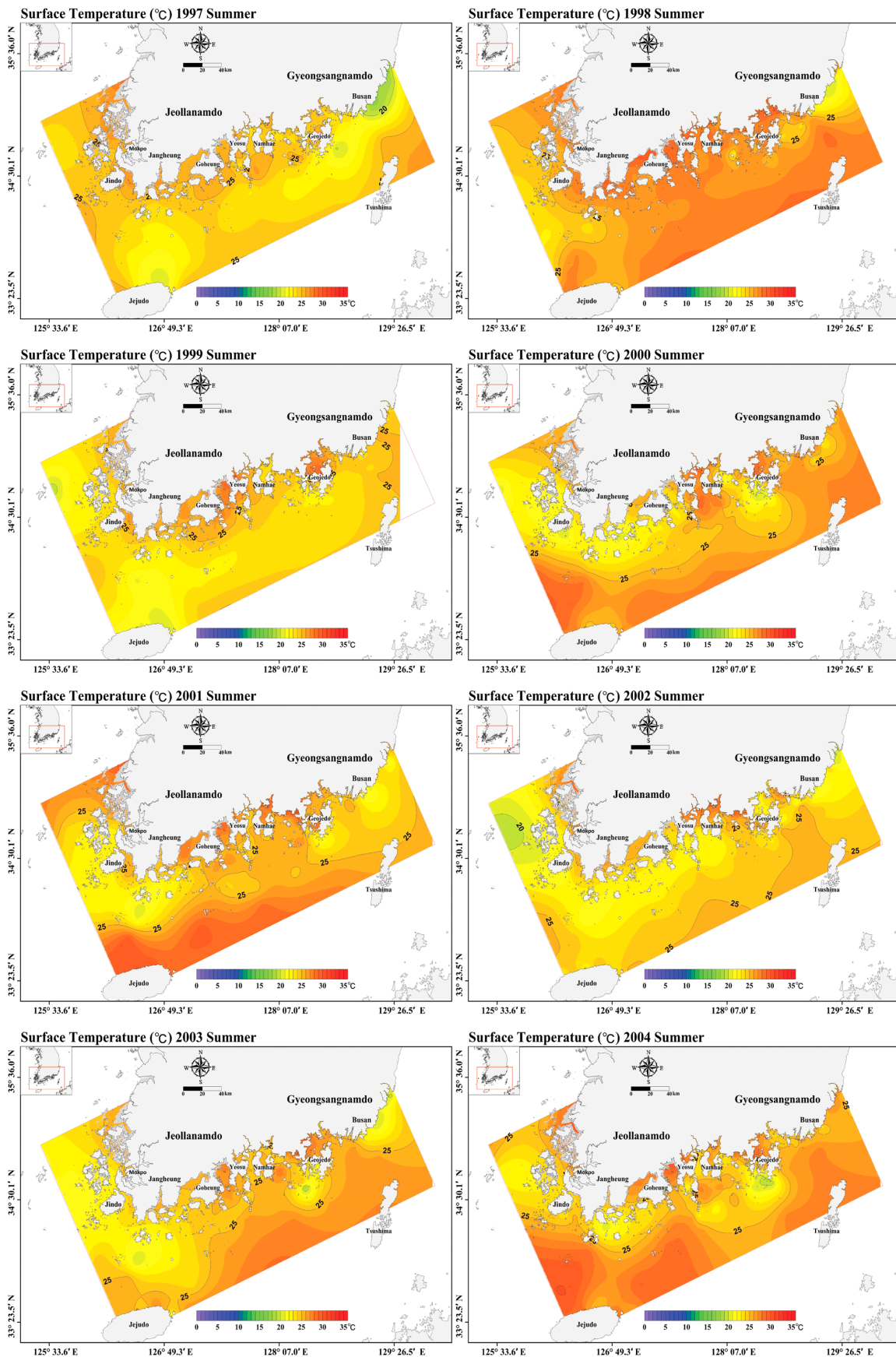


Fig. 6. Horizontal distributions of surface water temperature in summer for each year.

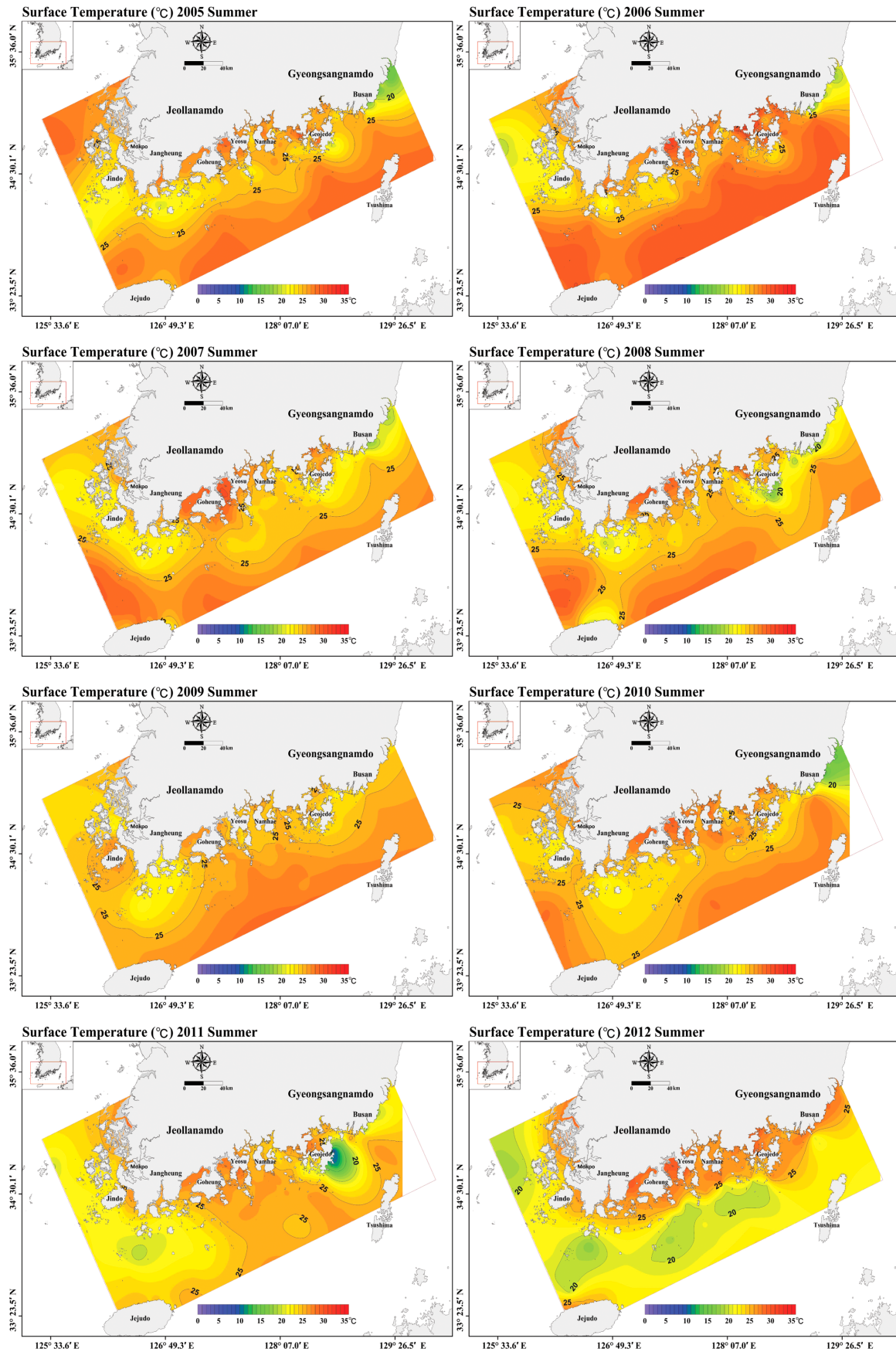


Fig. 6. (continued)

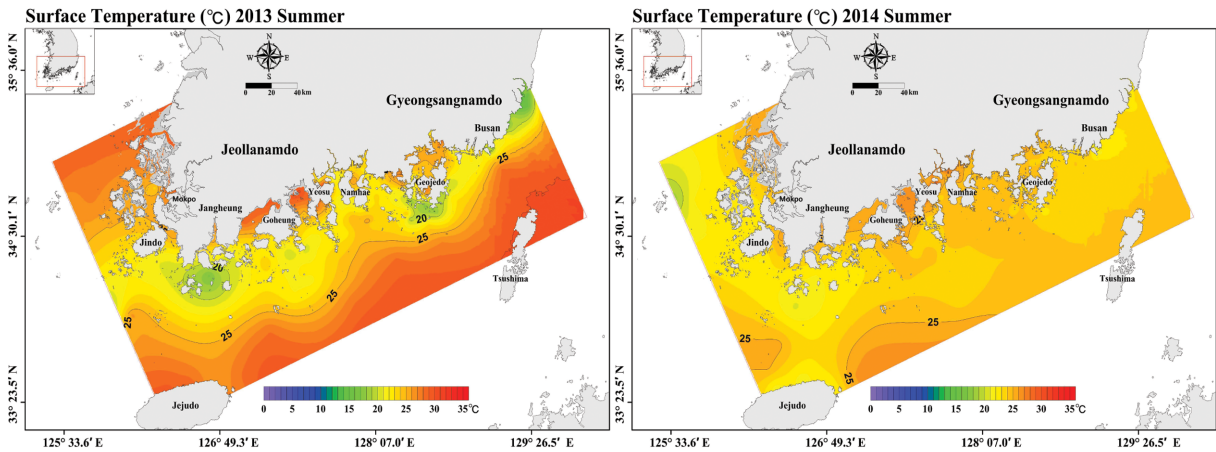


Fig. 6. (continued)

에서 관측된 수온의 연 변화를 나타낸다. 단 여기서 Fit line은 연 변화의 선형적인 추세선이다. 이 결과에 따르면, 표층수온은 9.5-32.0 °C(평균수온은 23.3-26.6 °C), 저층수온은 1.8-33.4 °C(평균수온은 18.3-23.0 °C)의 범위를 보였으며, 표층과 저층간의 평균 수온차는(추세선을 기준으로 판단할 때) 약 4-5 °C로 나타났다. 또한, 1998년과 2012년에는 표층과 저층 모두 평균수온이 상승한 반면 2006년에는 표층의 평균수온은 상승하였으나 저층의 평균수온이 현저하게 하강하는 모습을 보였다. 표층의 평균수온은 조사기간 중 다소 상승하는 추세를 나타낸 반면, 저층의 평균수온은 2006년을 기점으로 하여 이전에는 하강하다가 이후 상승하는 듯한 모습을 보였다. 또한, 표층에 비해 저층 평균수온의 변화폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 한편, Lee and Kim[2013] 등이 실시한 동중국해 해면수온의 장기변동조사에서도 수온이 전반적으로 상승하는 것으로 나타나 본 연구결과와 정성적으로는 동일한 결과를 보여주었다.

한편, Fig. 6는 조사기간 중 하계 표층 평균수온의 수평적인 분포를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 하계에는 한국남해 연안수가 그 세력을 확장하여 외해를 흐르는 고온의 쓰시마난류수계와의 사이에는 Lee et al.[2014]의 결과로 볼 때 대략 25 °C를 전후한 수온전선을 형성하고 있음을 알 수 있다. 특히, 이들 중 2005년, 2007년 및 2013년에는 보다 더 뚜렷한 수온전선이 남해안을 따라 형성되었고, 또한 1998년, 2001년, 2004년 및 2006년에는 다른 해에 비해 상대적으로 고수온의 쓰시마난류수계가 우리나라 남해 연안에 더 근접하여 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

또한, 2010년과 2013년의 경우, 남해안의 동부해역인 부산의 북부지역에 수온 15 °C 전후의 냉수대가 각각 출현한 것을 볼 수 있다. 이상해황 속보에 따르면, 국립수산과학원(기후변화연구과)은 2010년 8월 16일부터 27일 사이에는 울진, 울기, 감포 등 해역에, 2013년 7월 10일부터 8월 22 사이에는 거제연안, 부산, 기장 등 해역에 각각 냉수대 주의보를 발령한 것으로 나타났다. 따라서 상기한 2010년과 2013년의 부산 북부 해역의 저수온역은 이러한 냉수대의 출현과 관련이 있는 것으로 판단되며, 또한 이 냉수대는 남해 리만해류(북한해류)의 확장에 의한 결과로 추론된다(Lee et al.

[2014]).

한편, Lee[1986]는 우리나라 남해에 미치는 수괴로서, 쓰시마난류수(하계: 수온 28.5 °C, 염분 30.40 psu), 황해난류수(하계: 수온 27.5 °C, 염분 30.4 psu), 중국대륙연안수(하계: 염분 23.5 psu), 황해중앙저층냉수(하계: 수온 10 °C 이하, 염분 33.0전후), 한국연안수(하계: 수온 25.5 °C, 염분 34.0 psu), 대한해협(쓰시마해협) 저층냉수 등을 거론하였다. 따라서 상기한 2010년과 2013년뿐만 아니라 1997년, 1999년, 2002년, 2004년, 2005년, 2006년, 2007년, 2008년, 2011년, 2012년 등에 나타난 타 해역에서의 저수온역도 황해중앙저층냉수나 남해 동부해역에 출현하는 냉수대와 관련이 있을 것으로 추측된다.

또한 Fig. 7은 조사기간 중 하계 저층 평균수온의 수평적인 분포를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 하계에 한국 남해안의 표층에서는 저온수(즉 냉수)가 출현하는 일부 해역을 포함하여 전반적으로 남해연안수의 수온은 낮고, 외양역의 수온은 상대적으로 높은 반면, 저층에서는 남해연안수의 수온은 높고, 외양역의 수온은 상대적으로 낮아 수온분포에 뚜렷한 차이를 보였다. 이것은 하계 남해 연안의 수심이 낮아 태양복사에 의한 저열효과로 인해 외양역에 비해 상대적으로 수온이 높은 것을 의미함과 동시에, 외양역을 흐르는 고온의 쓰시마난류수계가 영향을 미치는 수심에는 한계가 있음을 의미한다. 또한, 전 조사기간을 통해 남해 동부 해역은 주위의 수괴와는 현저히 다른 수온(10 °C 이하)의 수괴가 나타나고 있으며, 전술한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 부산 북부 해역의 경우 2010년과 2013년에는 표층에서도 저수온의 수괴가 출현하였다.

한편, Lee et al.[2014]은 쓰시마난류수의 세력이 약해진 해에는 북한해류(즉 리만해류)가 상대적으로 우세하여 우리나라 동해안을 따라 남하하여 그 세력을 더욱 확장한다고 하였다. 그들은 특히 이때 하계 남풍이 불면 표층과 저층간의 흐름의 역전현상이 일어나 저층수가 표층으로 용승할 수 있다고 주장하였다. 따라서 Fig. 7에 나타난 바와 같은 남해 동부 해역(부산 또는 부산의 북부)의 저층냉수는 북한해류(또는 리만해류)의 영향일 가능성이 크다. 또한, Fig. 6에서 보이는 표층에 출현하는 저수온수(또는 냉수)는 아

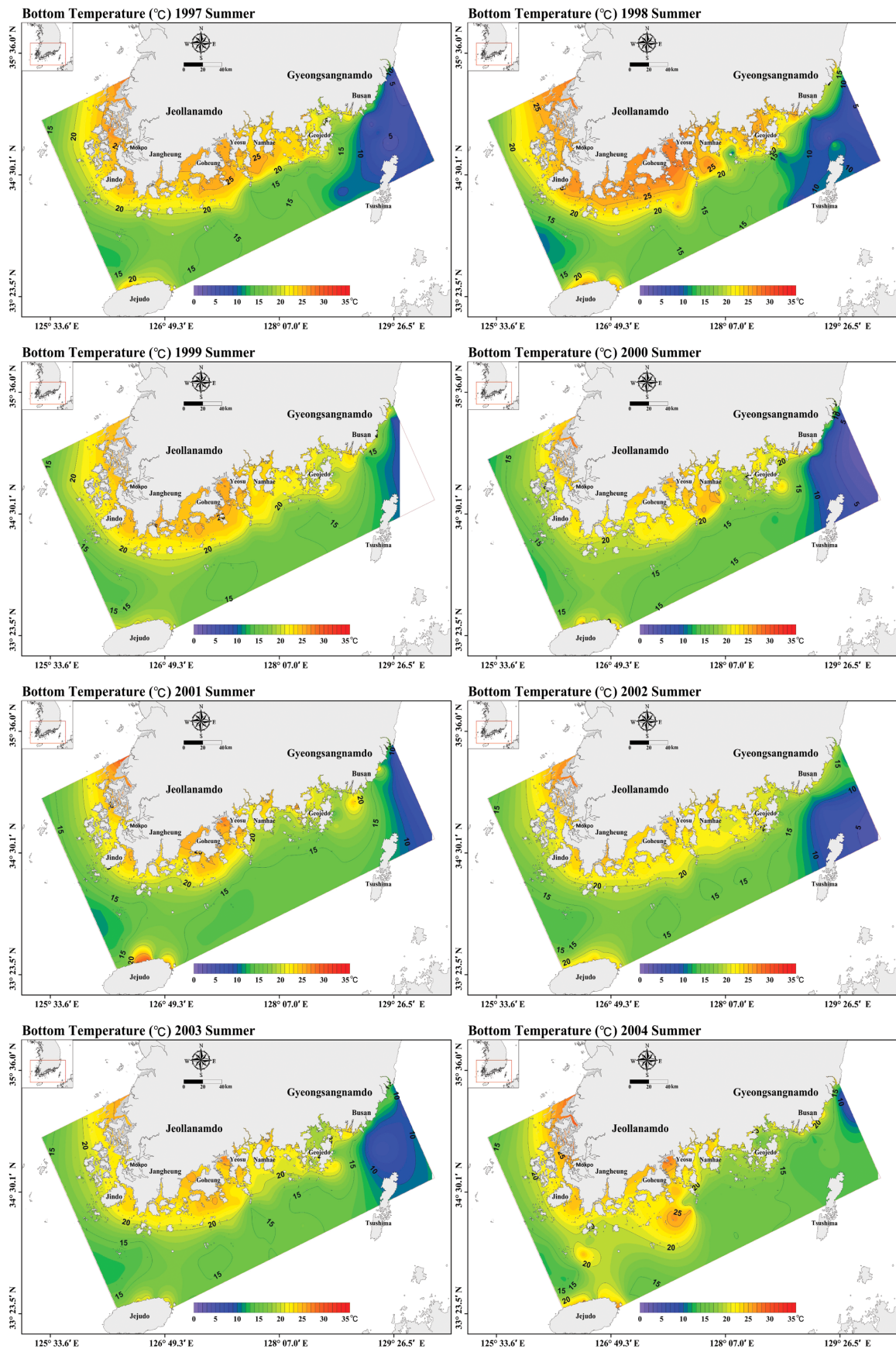


Fig. 7. Horizontal distributions of bottom water temperature in summer for each year.

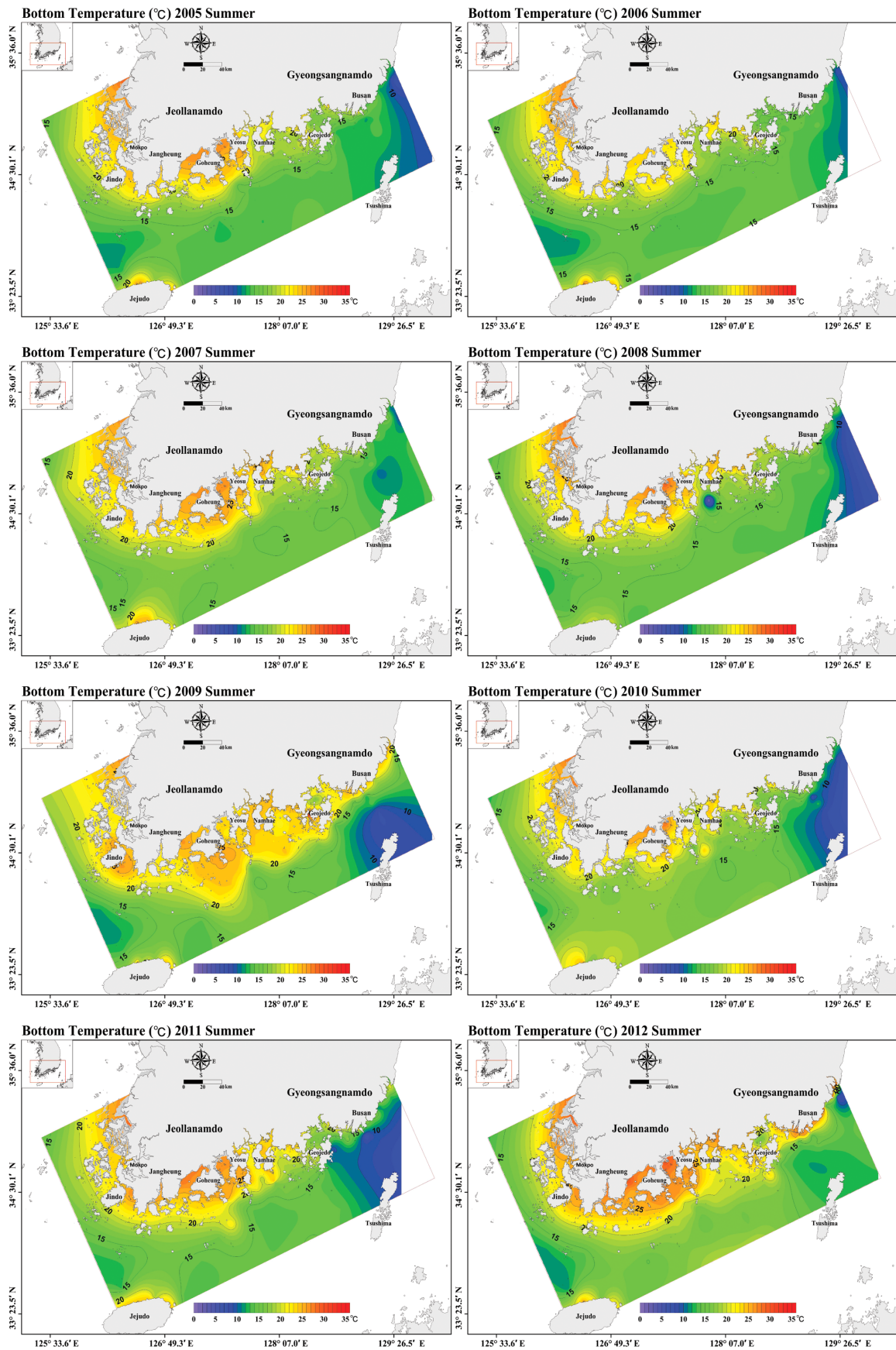


Fig. 7. (continued)

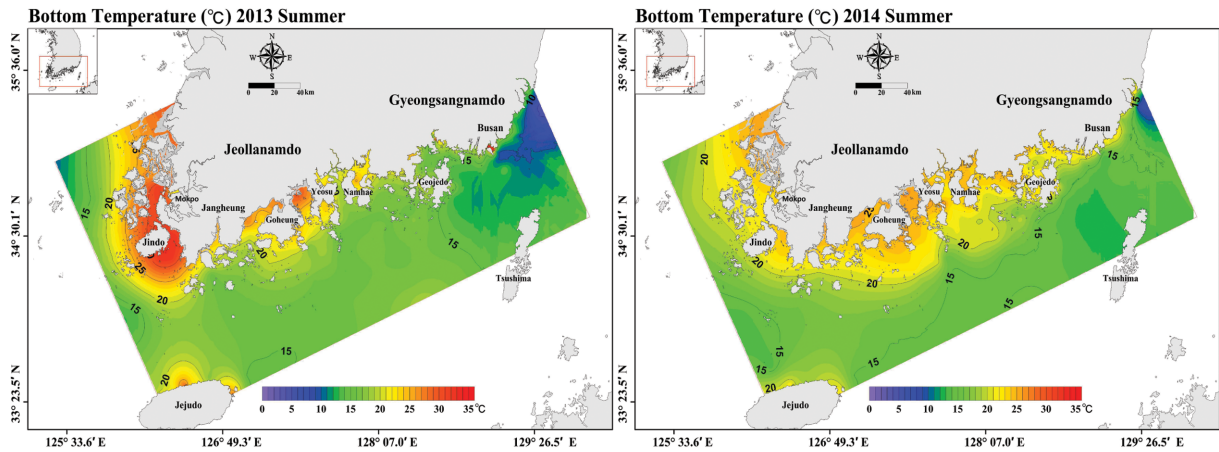


Fig. 7. (continued)

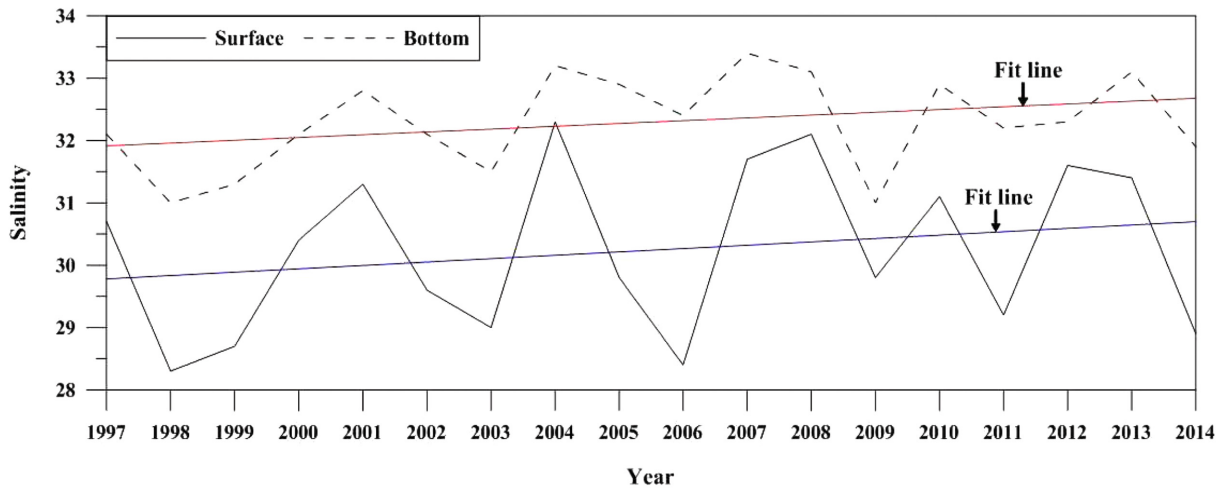


Fig. 8. Mean salinity at the surface and bottom layers for each year.

마도 하계의 탁월풍인 남풍이 불 때 저층 냉수가 용승한 결과로 생각된다.

3.2 염분 분포

Fig. 8는 조사기간 중, 남해연안 260개 정점에서 매년 8월 표층과 저층에서 관측된 염분의 연 변화를 나타낸다. 단 여기서 fit line은 연 변화의 선형적인 추세선이다. 이 결과에 따르면, 표층염분은 2.5-35.6 psu(평균염분은 28.3-32.3 psu), 저층염분은 12.7-35.2 psu(평균염분은 31.0-33.4 psu)의 범위를 보였으며, 표층과 저층간의 평균 염분 차는(추세선을 기준으로 볼 때) 약 1.1-2.8 psu로 나타났다. 또한, 표층과 저층 염분은 대략 3-5년을 주기로 변동하며, 해에 따른 변동 형태가 유사한 것을 알 수 있다. 게다가 표층과 저층 염분 모두 전반적으로 해가 갈수록 점차 상승하는 경향을 나타내고 있는데, 그 변동 폭은 저층에 비해 표층이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 9는 남해안 염분에 영향을 미칠 것으로 예상되는 양쯔강 하천유량의 60년간(1951-2009)의 월 평균유량의 변화를 나타

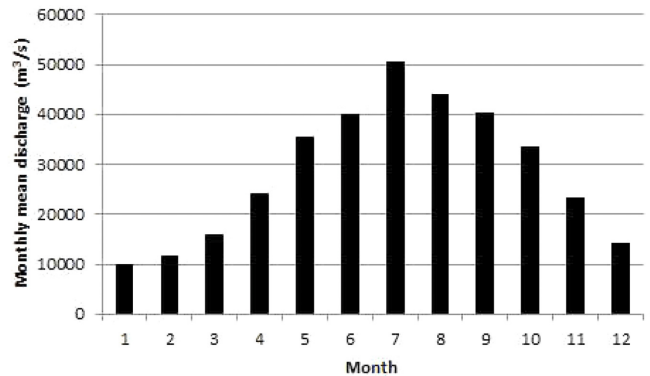


Fig. 9. Monthly mean discharge of the Yangtze River during 10 years (1951-2009) (Liu and Shen[2011]).

낸다. 이 결과에 따르면, 양쯔강의 하천유량은 7월(50,456 m³/s)과 8월(44,112 m³/s)에 가장 많은 것을 알 수 있다(평균 홍수기 유량: 56,800 m³/s, 평균 갈수기 유량: 16,500 m³/s). 반면, Fig. 10은 우리나라 남해안으로 유입하는 낙동강, 섬진강 및 영산강의 8월의 하천

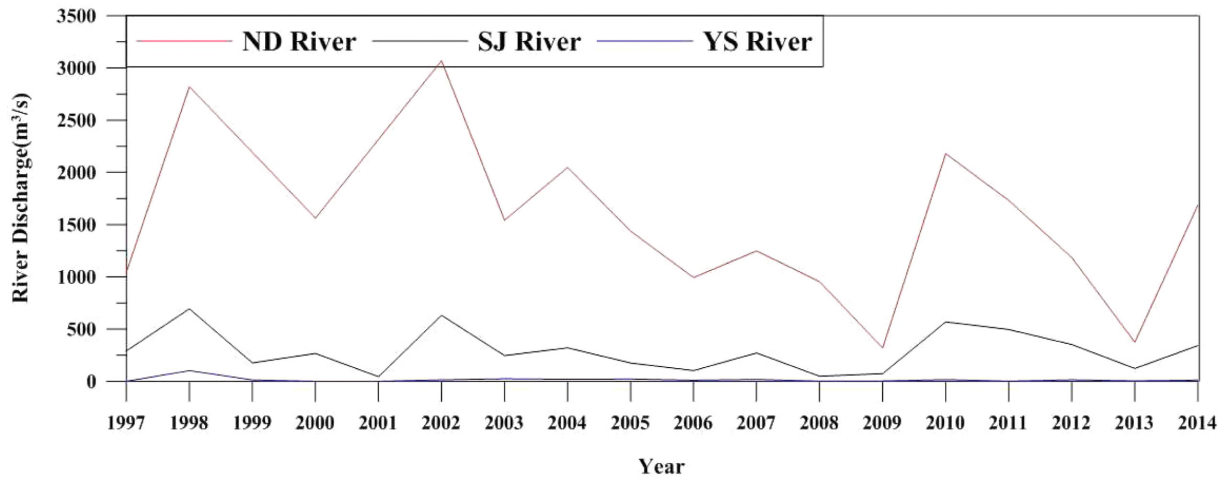


Fig. 10. River discharge on August of the Nakdong (ND) River, Seomjin (SJ) River and Yeongsan (YS) River from 1997 to 2014.

유량의 연변화를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 18년간(1997-2014)의 낙동강의 8월의 평균유량은 1,512 m³/s로, 섬진강의 평균유량 289 m³/s이나 영산강의 평균유량 15 m³/s에 비해 현저히 많은 것을 알 수 있다. 또한, 이들 하천의 지리적 위치로 볼 때, 낙동강은 주로 남해안의 동부해역, 섬진강은 중부해역, 영산강은 서부해역에

각각 영향을 미칠 것으로 생각된다. 그러나 영산강의 경우는 낙동강이나 섬진강에 비해 상대적으로 유량이 매우 적어 남해연안에 미치는 영향은 무시할 만하다. 일반적으로 볼 때, 하천유량이 많은 해는 염분이 낮아지고, 상대적으로 유량이 적은 해는 염분이 높아질 것으로 예상된다. 따라서 1998년, 2003년, 2006년은 표층염분이 다

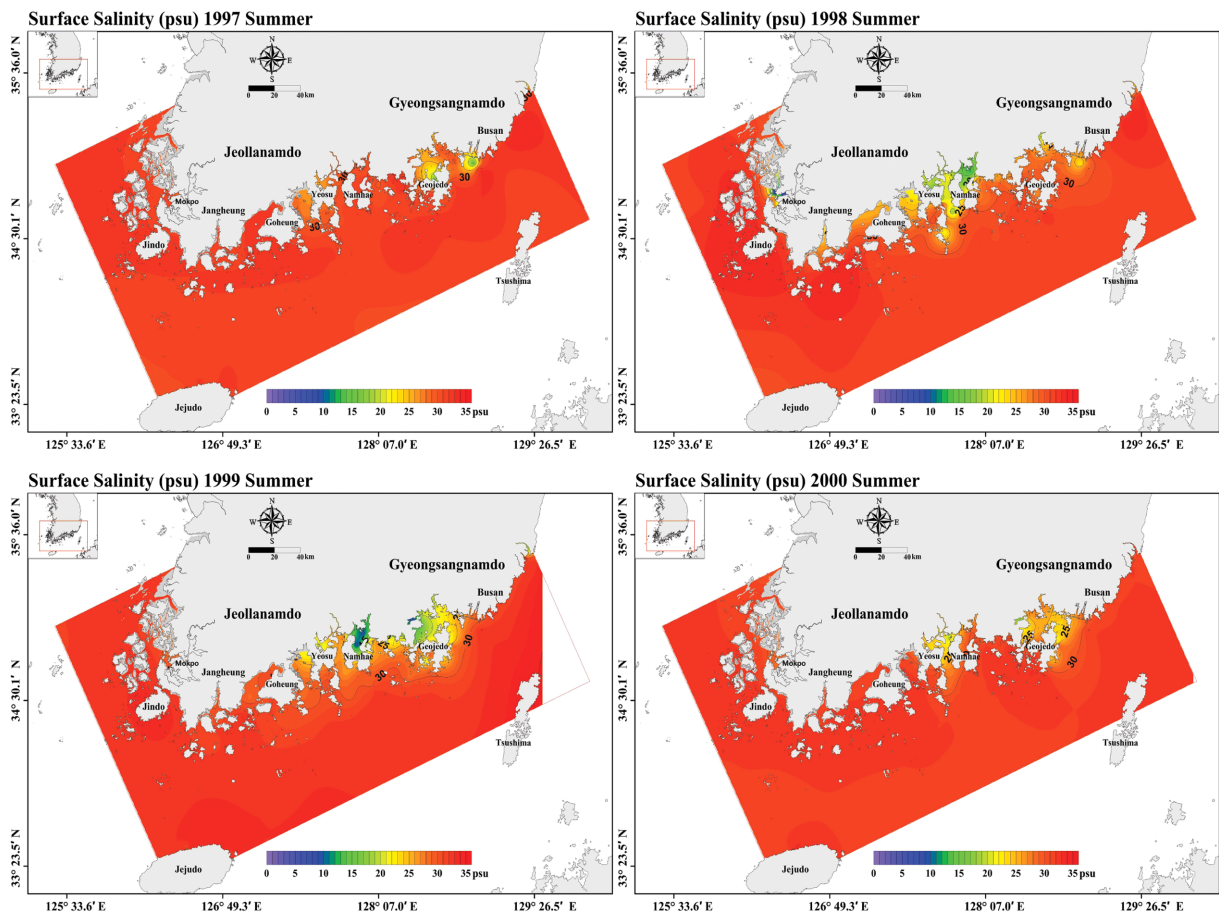


Fig. 11. Horizontal distributions of surface salinity in summer from 1997 to 2014.

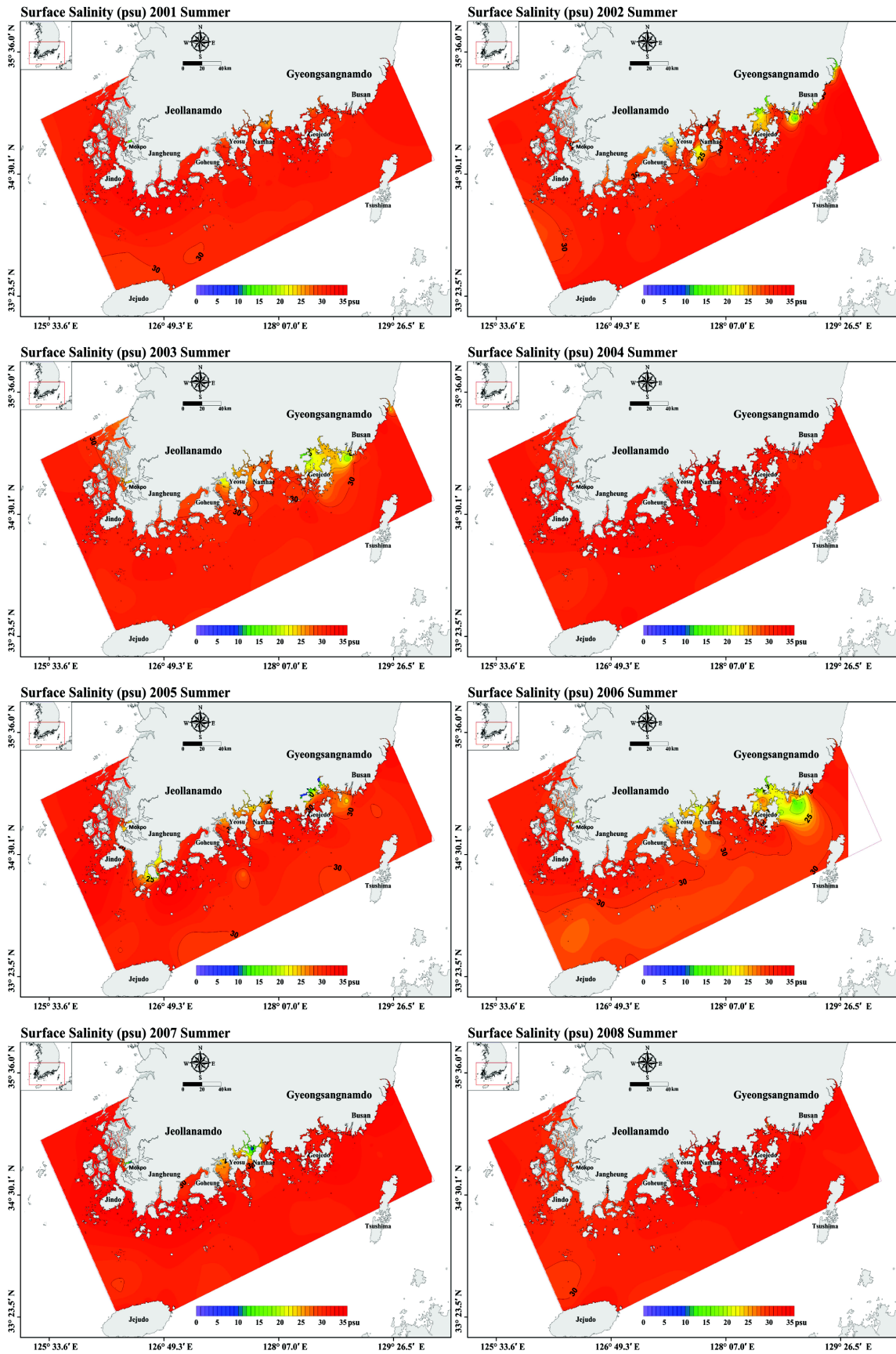


Fig. 11. (continued)

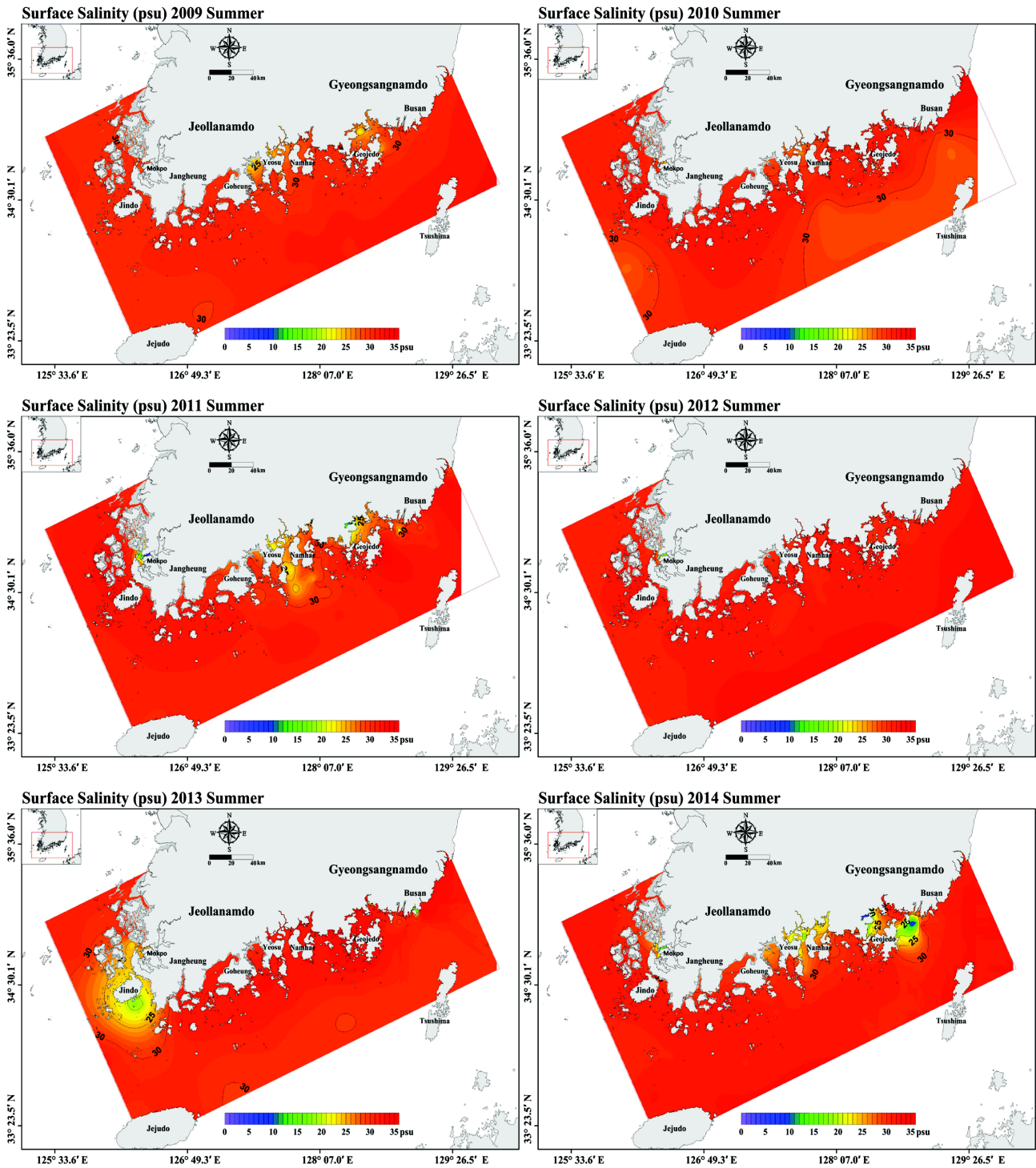


Fig. 11. (continued)

른 해에 비해 비교적 낮아, 이들 해에 있어서의 하천유량은 다른 해에 비해 상대적으로 많을 것으로 판단된다. 그러나 1998년에 낙동강과 섬진강의 하천유량이 다른 해에 비해 상대적으로 많은 경우를 제외하고는 2003년과 2006년에는 하천유량이 매우 적었다. 반면, 2001년, 2004년, 2008년의 경우는 다른 해에 비해 염분이 높은 해이므로 하천유량이 적은 해일 것으로 예상되는데, 역시 이들 해의

하천유량은 다른 해에 비해 상대적으로 적었다. 따라서 상기한 사실로부터 종합적으로 판단해 볼 때, 염분의 변화가 하천유량과 큰 상관관계를 가진다고 볼 수 있다. 하지만 염분의 변화가 하천유량에 의해서만 지배를 받는다고 단정해서는 안된다. 예를 들면 일사에 의한 증발량 등의 영향도 고려해야 하기 때문이다.

한편, Fig. 11은 조사기간 중 하계 표층의 평균염분의 수평적인

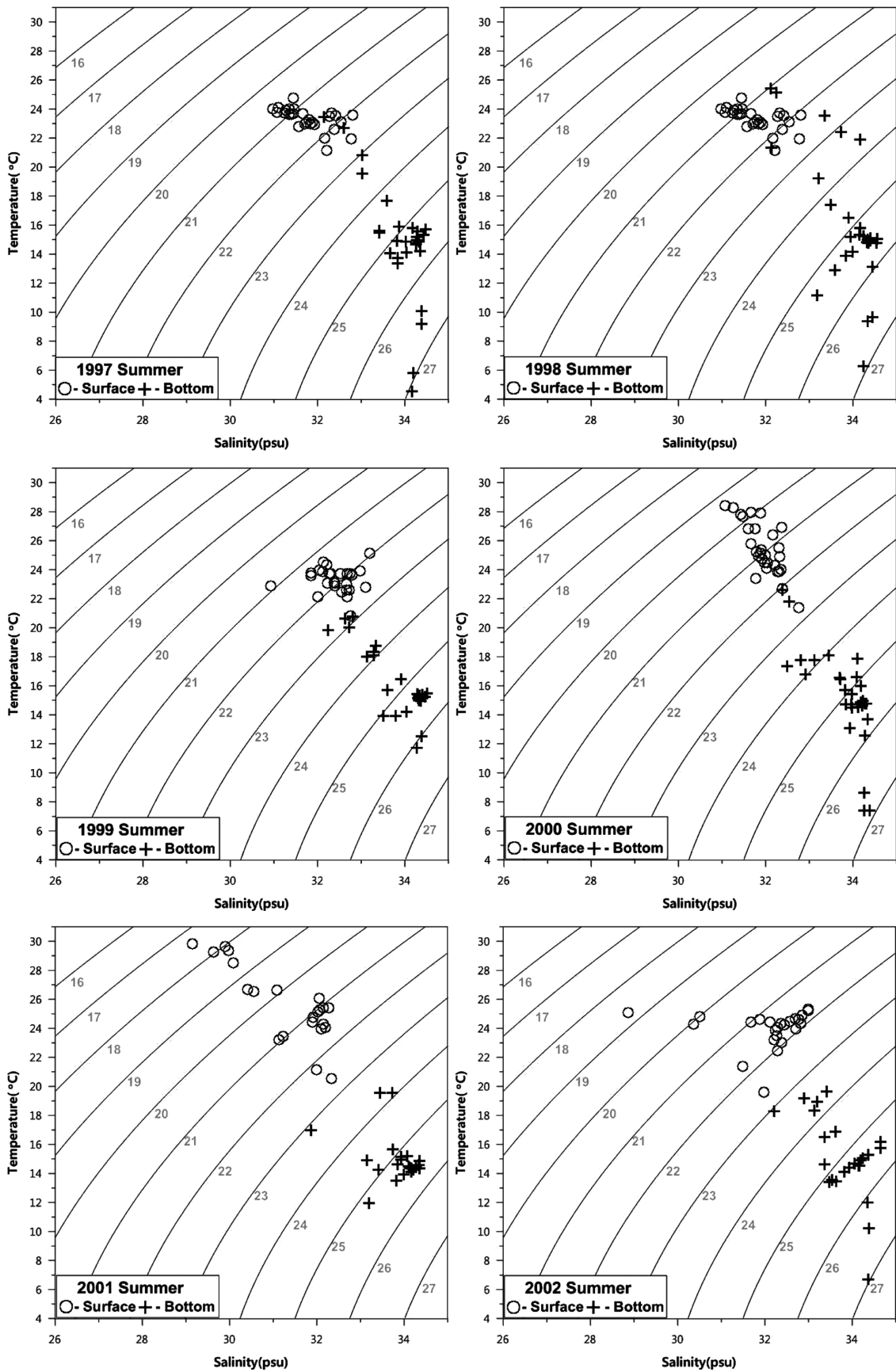


Fig. 12. T-S diagram for each year.

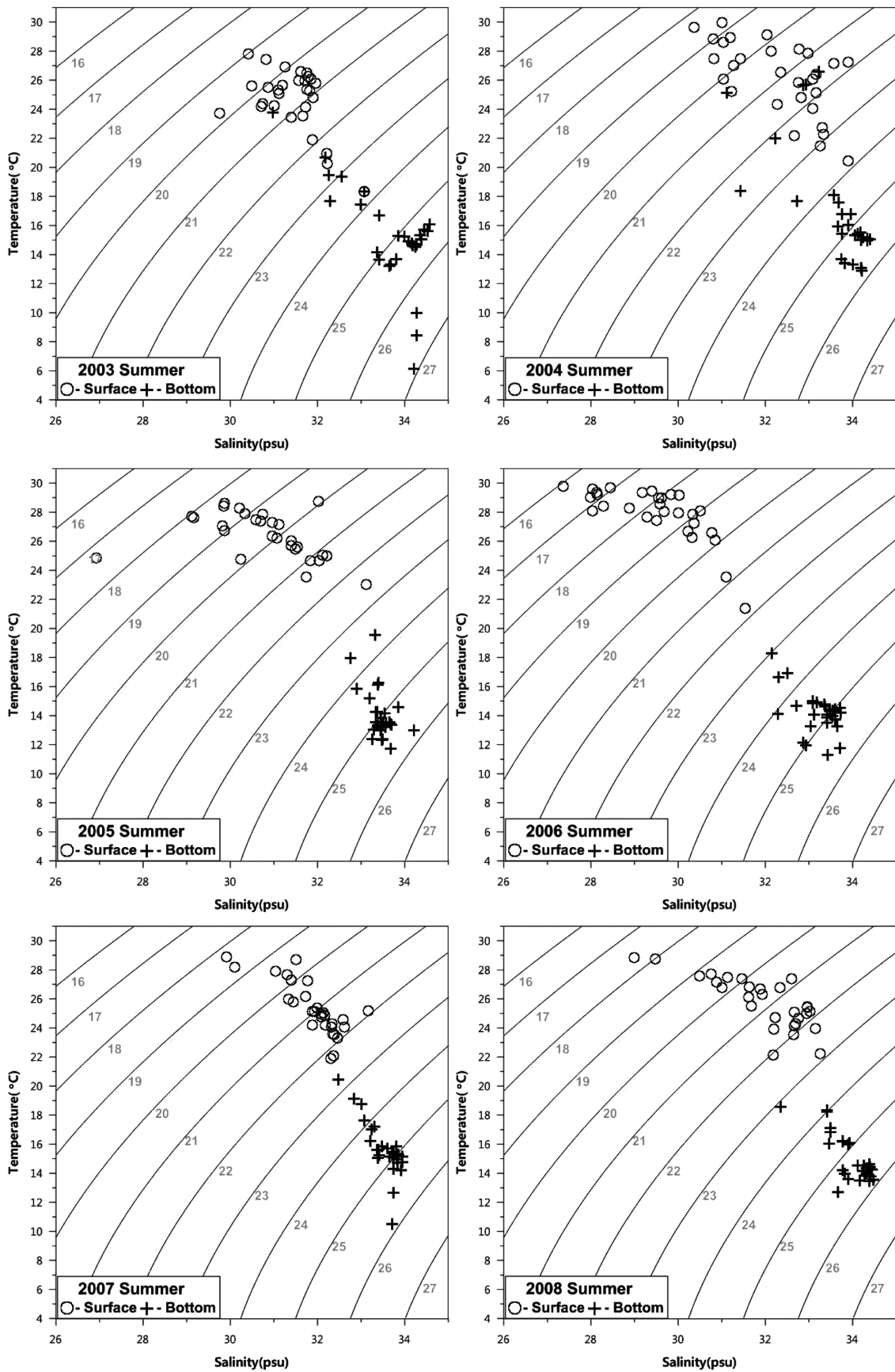


Fig. 12. (continued)

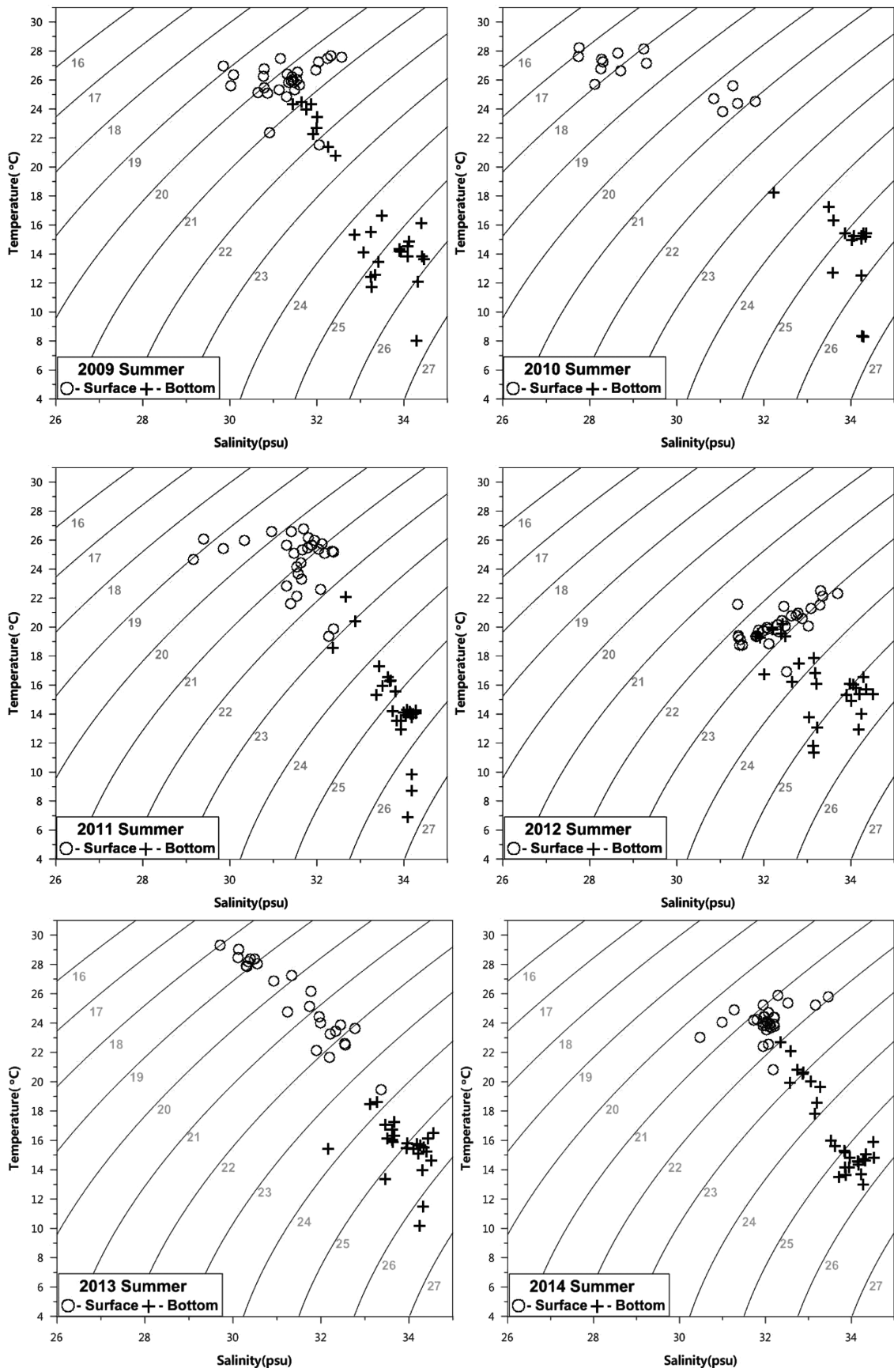


Fig. 12. (continued)

분포를 나타낸다. 단, 저층 염분에 대하여는 전술한 Fig. 8에서 보는 바와 같이 표층에 비해 다소 염분이 높은 것을 제외하고는 연변동의 형태가 표층염분과 유사하여 여기서 따로 명시하지는 않았다. 이 결과에 따르면, 낙동강이나 섬진강, 또는 영산강으로부터의 하천유출수가 영향을 미칠 것으로 예상되는 해역에서의 표층염분이 타 해역에 비해 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 물론 이때 저층 염분에는 큰 변화가 거의 없다는 사실을 원시자료로부터 확인하였으므로, 이것은 표층으로의 육수유입을 반영한다고 생각된다. 반면, 2010년의 경우, 목포 외양역의 저층에서 낮은 염분의 수괴가 출현한 것을 볼 수 있는데, 이것은 (Lee[1986])가 지적하였듯이 아마 염분이 낮은 중국대륙연안수(하계: 염분 23.50 psu), 즉 양쯔강 유출수의 영향이 아닌가 추측된다. 또한, Seo *et al.*[2013]이 수치모형 ROMS (Regional Ocean Modeling System)에 의해 계산한 8월의 표층의 염분분포에 따르면, 해에 따라 세력의 차이는 있으나, 양쯔강 유출수가 하계에 우리나라 남해안에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 우리나라 남해안 하계에 있어서 염분분포는 육지로부터의 하천수의 유입, 양쯔강 유출수 및 증발 등의 영향이 복합적으로 작용하여 결정된다고 생각된다.

3.3 수괴분석

3.3.1 T-S diagram

T-S diagram에 의한 수괴분석에는 1997년도부터 2014년까지 18년간 국립수산물품질관리원 29개의 정선해양관측정점에서 측정된 표층 및 저층의 수온과 염분 값을 사용하였다.

Fig. 12은 관측기간 중 29개의 정선해양관측정점에서 측정된 8월의 표층 및 저층의 수온과 염분 값을 사용하여 작성한 T-S diagram을 나타낸다.

이 결과에 의하면, 표층의 수온, 염분 및 밀도값(σ_t)은 각각 16-30°C, 26-34 psu, 18-23, 저층의 경우는 각각 4-27°C, 30-35 psu, 22-27의 범위를 보였다. 따라서 표층수는 고온·저염으로서, 저온·고염의 저층수에 비해 상대적으로 밀도가 낮으나, 해에 따라서는 표층수와 저층수간에 성층이 더 강화되거나 혼합(mixing)이 증가하는 모습을 엿볼 수 있다. 즉, 2005년, 2006년, 2008년, 2010년, 2013년의 경우는 성층이 강화된 시기인 반면, 1997년, 1998년, 2009년, 2012년, 2014년의 경우는 표층수와 저층수간의 혼합이 두드러진 시기로 판단된다. 특히, 2012년(태풍 Bolaven, Tembin)에는 하계(8월)에 태풍이 남해안을 통과한 시기로, 이에 따른 영향으로 혼합이 발생한 것으로 생각된다.

3.3.2 클러스터 분석(Cluster analysis)

전술한 T-S diagram에서 이용한 29개의 정선해양관측자료를 포함한 47개 정점의 수온과 염분 값을 사용하여 클러스터 분석을 실시하고 그 결과를 각 연도별로 표층과 저층에 대하여 덴드로그램(樹形圖), 수괴의 분포(또는 배치) 형태 및 MDS(Multi-Dimensional Scaling; 다차원 척도법)로 나타내었다. 단, 여기서는 분석한 자료의 양이 너무 방대하여 표·저층간에 성층이 강화된 2005년과 또한 태풍

(볼라벤/템빈)으로 인해 혼합이 발생하였을 것으로 예상되는 2012년을 대표적으로 Fig. 13와 Fig. 14에 나타내었다.

먼저 이들 결과를 보면, 2005년에는 대체로 저온·고염의 수괴 B가 연안역에, 그리고 저온·중염의 수괴 A가 외양역에 배치되어 두 수괴간에 밀도 전선을 형성하고 있는 것으로 판단된다. 반면에, 2012년에는 중부 및 서부 해역은 저온·저염의 수괴 B와 C가 연안역에, 그리고 고온·저염의 수괴 A가 중부해역의 외양역과 동부해역의 연안역에 각각 출현하고 있다. 따라서 이때는 우리나라 남해안을 관통한 태풍의 영향으로 수괴간의 (수평방향뿐만 아니라 연직방향으로도) 혼합이 왕성하였을 것으로 판단된다. 이것은 전술한 Fig. 12의 T-S diagram으로부터도 그 사실을 확인할 수 있다. 그 밖의 해에 있어서도 마찬가지로 클러스터 분석을 실시하였으며, 이들 결과를 포함한 전 조사기간 중의 분석결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉, 조사기간 중 연안역의 표층은 외양역에 비해 상대적으로 저온·저염의 수괴가 배치하고 있는 경우가 우세하였다. 특히, 2000-2001년, 2003-2009년 등의 경우는 연안역과 외양역 사이에 뚜렷하지는 않으나 밀도전선을 형성하고 있는 것으로 판단되었다.

한편, 저층의 경우도 마찬가지로 클러스터분석을 실시하여, 각 해에 대한 덴드로그램, 수괴의 분포(또는 배치) 형태 및 MDS 등을 검토하였다. 그 결과, 수괴의 수평적인 분포나 배치 형태는 표층의 경우와 크게 다르지 않았다. 반면, 연안역은 대체로 저온·저염수가, 외양역은 저온·고염수가 출현하는 경우가 상대적으로 우세하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 1997년부터 2014년까지 18년간 우리나라 남해안의 서쪽 함평에서부터 동쪽의 울산에 이르는 278개 해양관측정점에서 하계(8월)에 관측한 수온 및 염분자료(국가해양환경정보통합시스템(<http://www.meis.go.kr>)에 공개된 자료)를 이용하여 우리나라 남해안 하계에 출현하는 수괴 분포와 그 물리적 특성을 파악하였다. 얻어진 주요 결과는 다음과 같다:

하계 남해안의 표층수온은 9.5-32.0°C(평균수온은 23.3-26.6°C), 저층수온은 1.8-33.4°C(평균수온은 18.3-23.0°C)의 범위를 보였으며, 표층과 저층간의 평균수온 차는 약 4-5°C로 나타났다. 조사기간 중 표층의 평균수온은 다소 상승하는 추세를 나타낸 반면, 저층의 평균수온은 전체적으로는 하강하는 추세를 나타내었다. 수온의 수평분포를 검토한 결과, 하계에는 한국남해 연안수가 그 세력을 확장하여 외해를 흐르는 고온의 쓰시마난류수계와의 사이에 대략 25°C를 전후한 수온전선을 형성하는 모습이 자주 출현하였다.

한편, 해에 따라서는 기장, 부산 등의 남해안 동부해역에서 수온 15°C 전후의 냉수대가 출현하였으며, 이는 남하하는 리만해류(북한한류)의 확장 또는 하계에 탁월풍인 남풍에 의한 저층냉수의 용승에 의한 결과로 판단되었다.

하계에 남해연안수의 표층 수온은 낮고 외양역의 수온은 상대적으로 높은 반면, 저층에서는 남해연안수의 수온은 높고 외양역의 수온은 상대적으로 낮았다.

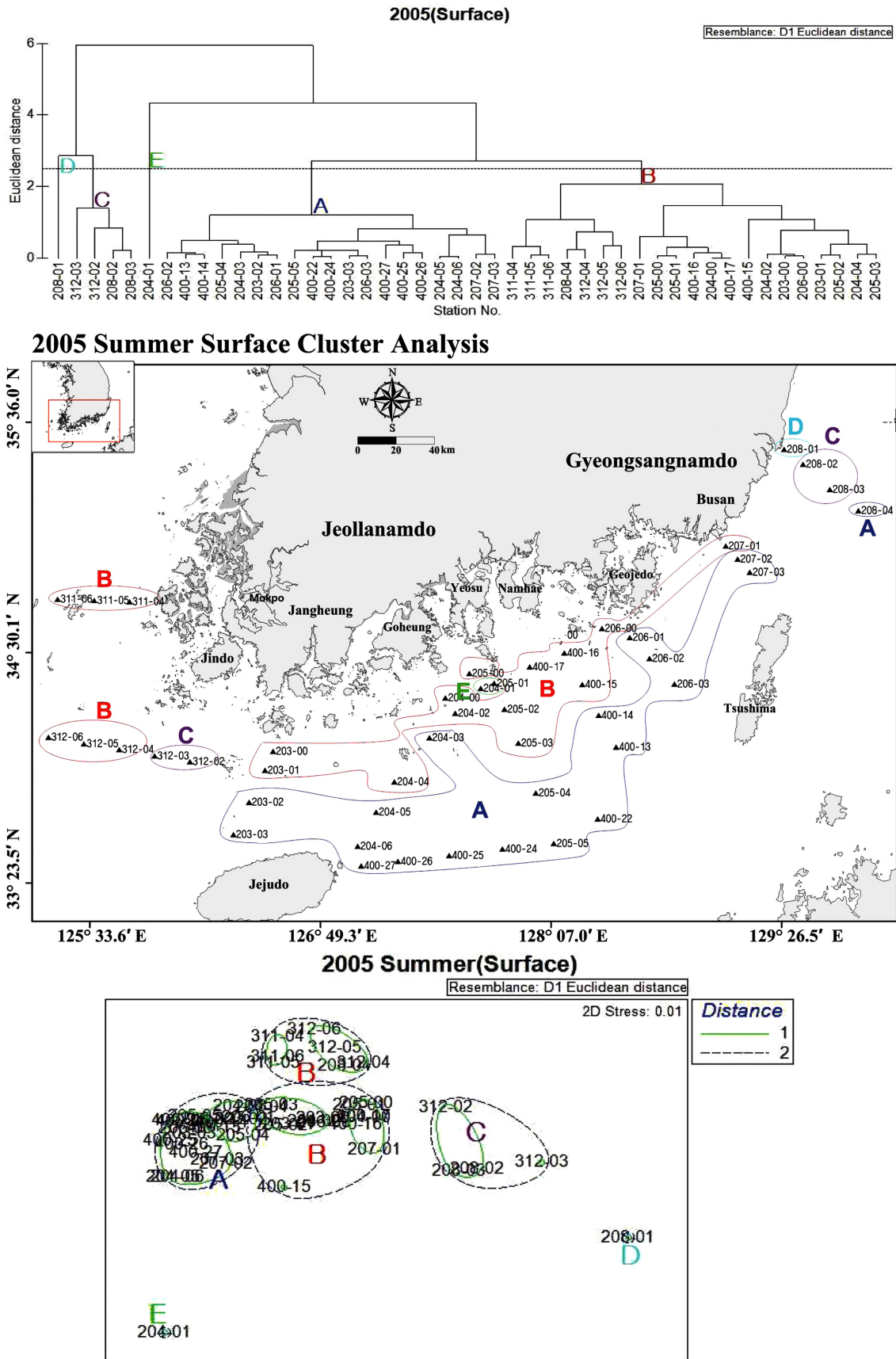


Fig. 13. Dendrogram (top), distributions of water masses (middle) and MDS (down) by a cluster analysis in 2005.

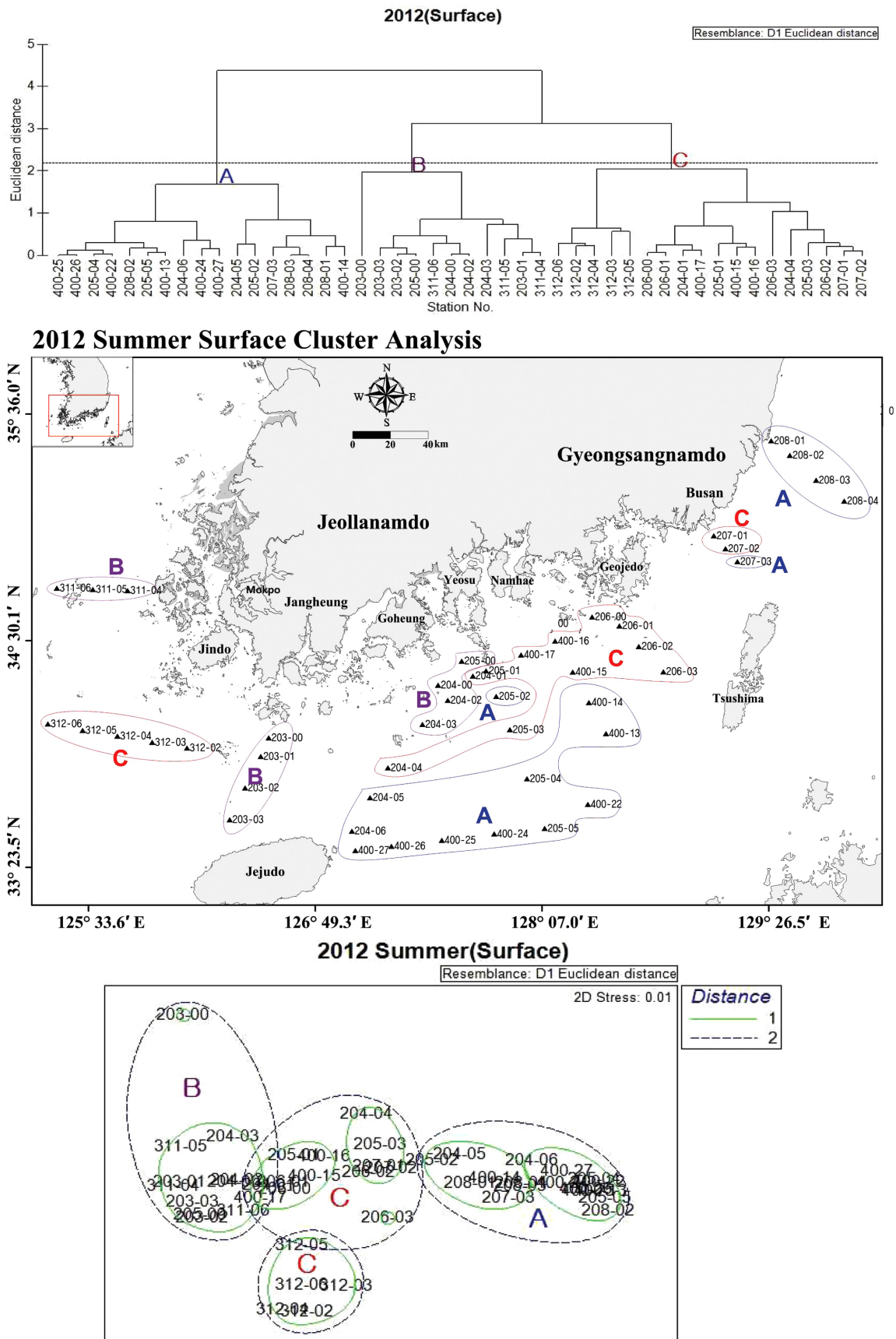


Fig. 14. Dendrogram (top), distributions of water masses (middle) and MDS (down) by a cluster analysis in 2012.

염분은 표층에서 2.5-35.6 psu(평균염분은 28.3-32.3 psu), 저층에서 12.7-35.2 psu(평균염분은 31.0-33.4 psu)의 범위를 보였으며, 표층과 저층간의 평균 염분차는 약 1.1-2.7 psu로 나타났다. 표층과 저층 염분 모두 전반적으로 해가 갈수록 점차 상승하는 경향을 나타내었다. 또한, 본 연구에서는 염분의 변화가 반드시 하천유량에 의해서만 지배를 받는다고 단정할 수는 없는 것으로 나타났다. 따라서 우리나라 남해안의 하계에 있어서의 염분분포는 육지로부터의 하천수의 유입, 양쯔강 유출수 및 증발 등의 영향이 복합적으로 작용하여 결정된다고 판단되었다.

T-S diagram에 의한 수괴분석결과, 표층수는 고온·저염으로 저온·고염의 저층수에 비해 상대적으로 밀도가 낮은 경향을 나타내었으나, 해에 따라서는 표층수와 저층수간에는 성층이 강화되거나 혼합(mixing)이 증가하였다. 특히, 혼합의 증가는 하계 우리나라 남해안을 통과하는 태풍에 의한 것으로 판단되었다.

클러스터 분석에 의한 수괴분포에서는 표층의 경우, 전 조사 기간을 통하여 볼 때, 대체적으로 연안역은 외양역에 비하여 상대적으로 저온·저염의 경우가 다소 많았다. 또한, 해에 따라서는 연안역과 외양역 사이에 뚜렷하지는 않으나 밀도전선을 형성하고 있는 것으로 판단되었다. 반면, 저층의 경우는, 연안역은 대체로 저온·저염수가, 외양역은 저온·고염수가 출현하는 경우가 다소 우세하였다. 또한, 조사기간 동안 남해안 서부해역과 제주해협 사이, 중부연안역과 외양역 사이, 동부해역 등에서는 (수온·염분에 기초하여) 물리적으로 다른 3-4개의 수괴가 각각 출현하는 것으로 판단되었다. 그러나 이들 수괴의 분포 (또는 배치 형태)는 대동소이하었다. 이것은 그 기원이 황해냉수괴, 중국연안수, 쓰시마난류, 한국남해고유수, 동부해역의 저층냉수의 용승(또는 북한한류의 남하) 등으로 생각되며, 이들간의 세력에 의해 수괴의 분포가 결정되는 것으로 추론되었다.

본 연구에서는 하계에 출현한 수괴(또는 밀도전선)의 시·공간적 변동 특성만을 조사하였기 때문에 동계에도 이와 유사한 수괴의 출현이나 분포특성을 가지는지에 대해서는 여전히 불명하다. 따라서 우리나라 남해안의 출현하는 수괴의 전체적인 분포 특성을 이해하기에는 아직 역부족이라 판단된다. 뿐만 아니라 영양염류나 클로로필 a 및 용존산소 농도분포 등 수질항목도 함께 조사하여 남해안의 종합적인 해양환경을 파악하는 것이 절실하며, 이에 대해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

References

- [1] Cho, E.S., Lee, S.Y., Kim, S.S. and Choi, Y.S., 2007, Marine environments and ecological characteristics of phytoplankton in southern coastal waters during June to October in 2004-2006, J. Environ. Sci., 16(8), 941-957.
- [2] H. Ju, 2011, Marine environment-fish species composition and resources density variations in the Korea southern coastal waters (2004-2008), Ph.D. dissertation, Dept. Environ. Oceano., Chonnam Nat. Univ., Yeosu, Korea.
- [3] Katatani, N. and Matsuto, T., 2006, Introduction to environmental statistics, Ohmsha, Tokyo, Japan.
- [4] Kong, Y., 1971, Study on the front of the Korean southern coastal areas, J. Korean Soc. Oceano., 6(1), 25-36.
- [5] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA) (<http://www.khoa.go.kr/khoa/pgmctrl/selectDictionary/>), 2017 (accessed 2017.01.09.)
- [6] Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM) (<http://www.koem.or.kr>)
- [7] Kuang, C., Chen, W., Gu, J., Su, T., Song, H., Ma, Y. and Dong, Z., 2017, River discharge contribution to sea-level rise in the Yangtze River Estuary, China, Conti. Shelf Res., 134, 63-75.
- [8] Kwon, S.J. and Kang, T.S., 2007, Numerical simulation for behavior of tidal elevation and tidal currents in the south sea, J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 19(3), 253-265.
- [9] Lee, J.H. and Kim, C.H., 2013, Long-term variability of sea surface temperature in the East China Sea: A review, Ocean and Polar Res., 35(2), 171-179.
- [10] Lee, M.O. and Choi, J.H., 2009, Distributions of water temperature and salinity in the Korea southern coastal water during *C. polykrikoides* blooms, J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng., 12(4), 235-247.
- [11] Lee, M.O., Otake, S. and Kim, J.K., 2014, Characteristics of cold water appeared in the southwestern East Sea, J. Fish. Mar. Sci. Edu., 26(3), 455-473.
- [12] Lee, S.W., 1986, Introduction to physical oceanography, Jibmundang, Seoul, Korea.
- [13] Liu, Z.M., and Shen, Z.L., 2011, (Eutrophication in the Changjiang River Estuary and adjacent waters, China Science Publishing & Media Ltd., Beijing, China.
- [14] Marine Environment Information System (MEIS) <http://www.meis.go.kr/>, 2017 (accessed 2017.01.09.)
- [15] Nagata, Y. and Munechika, M., 2001, Introduction to multivariate analysis, Saiensusha, Tokyo, Japan.
- [16] National Institute of Fisheries Science (NIFS) <http://www.nifs.go.kr/>, 2017 (accessed 2017.01.09)
- [17] O, H.J., Lee, Y.H., Yang, J.H. and Kim, S.H., 2007, The characteristics of phytoplankton distributions and marine situations of the southern coast in summer, 2004, J. Geo. Info. Sys. Assoc. Korea, 10(3), 40-48.
- [18] O, H.J. and Seo, Y.S., 2006, The characteristics of spatio-temporal variations of marine conditions of Korean coast and chlorophyll_a distributions, J. Geo. Info. Sys. Assoc. Korea, 9(3), 1-10.
- [19] Seo, G.H., Cho, Y.K., and Choi, B.J., 2013, Variations of heat transport in the northwestern Pacific marginal seas inferred from high-resolution reanalysis, Progress in Oceano., 121, 98-108.
- [20] Sun, T., Yang, Z., Shen, Z. and Zhao, R., 2009, Environmental flows for the Yangtze Estuary based on salinity objectives, Communications in Nonlinear Sci. Numerical Simulation, 14,

959-971.

- [21] Wang, J., Yan, W., Chen, N., Li, X. and Liu, L., 2015, Modeled long-term changes of DIN:DIP ratio in the Changjiang River in relation to Chl-a and DO concentrations in adjacent estuary, *Estuarine, Coast. Shelf Sci.*, 166, 153-160.
- [22] Water Resources Management Information System (WAMIS) <http://www.wamis.go.kr/>, 2017 (accessed 2017.01.09.)
- [23] Yoon, S.C., 2015, Long-term variation in ocean environmental conditions of the East Sea and the northern East China Sea, Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng., Kwandong University, Gangneung, Korea.
- [24] Zhoa, J., Zhang, M., Lin, B. and Liu, P., 2015, Lowland fluvial phosphorus altered by dams, *Water Resources Res.*, American Geophysical Union, 2211-2226.

Received 6 February 2018

Revised 14 March 2018

Accepted 26 March 2018