

제주도 북서해역의 해수분포의 계절변화와 여름철의 황해난류

방익찬 · 노홍길* · 이재학**

제주대학교 해양학과 · *제주대학교 어업학과 · **한국해양연구소

Seasonal Variation of Water Mass Distributions in the Northwestern Sea of Cheju-do and Yellow Sea Warm Current in Summer

Ig-Chan Pang · Hong-Kil Rho* · Jae-Hak Lee**

Department of Oceanography, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea

**Department of Fishery, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea*

***Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O.Box 29, Seoul 425-600, Korea*

With CTD data observed on the north western sea of Cheju Island in Feb. 17~18, Jun. 20~22, Sep. 6~15, 1994, and CNU(Cheju National University) data observed previously, the seasonal variation of water mass distribution and circulation are studied.

In winter, Tsushima Warm Water(TWW) is distributed near Cheju-do from the western sea of Cheju-do to the Cheju Strait, and totally flows to the Cheju Strait. Yellow Sea Cold Water(YSCW) is distributed over the western coast of Korean Peninsula down to the southern sea of Soheuksan-do, and flows southward along the western coast of Korean Peninsula. Yellow Sea Warm Water(TSWW) is distributed between TWW and YSCW, and flows into the central Yellow Sea through the western sea of Soheuksan-do.

In summer, the upper and lower layers show different distributions. In upper layer, TWW disappears and less saline water of down to 31 ‰ appears, which shows that the influence of Yangtze Coastal Water already begins in June. The low salinity water is distributed from the western sea off Cheju-do to the Cheju Strait. On the southwestern coast of Korean Peninsula near Taeheuksan-do, relatively cold and saline water is distributed. In the lower layer, Yellow Sea Bottom Cold Water(YSBCW) southeasterly expands from the central Yellow Sea and pushes YSWW to Cheju-do. The result of data analysis shows that the homogeneously saline water column in the cold water area is possible only by the northward supply of southern saline water. According to the temperature distribution of deep layer, which is less influenced by river runoff, YSWW flows northward along the western coast of Korean Peninsula from the adjacent sea of Cheju-do.

YSWW's influx along the western coast of Korean Peninsula in summer might appear intermittently, however, the possibility itself is important at present. The result agrees with the seasonal circulation structure presented by Pang *et al.*(1992) : in winter, southward flow along the coast and northward flow along the central Yellow Sea, and in summer, northward flow along the coast and southward flow along the central Yellow Sea.

Key words : Yellow Sea Warm Current, water mass distribution, seasonal variation, Cheju-do

서론

제주도 주변해역에는 여러 해수들의 흐름이 있다. 그러한 흐름에는 여름철의 황해저층냉수의 남하(Asaoka and Moriyasu, 1966 ; Nakao, 1977 ;

Lie, 1984 ; Park, 1985, 1986 ; Kim *et al.*, 1991 ; Youn *et al.*, 1991), 겨울철의 황해난류수의 북상(Uda 1934 ; Byun and Chang 1988 ; Pang *et al.* 1992), 여름철에 제주해협으로 양자강연안수의 유입 (Yu *et al.* 1983 ; Beardsley and Limeburner

1983 ; Zhao *et al.*, 1983 ; Kim., 1986) 등이 있다. 이러한 흐름들은 대부분 개별적으로 연구되어 왔는데 그것은 이들이 자기 다른 역학에 의한 것이라는 생각을 반영하는 것이다. 그러나 최근에는 이들이 개별적인 역학에 의해서가 아니라, 이 해역 전반에 걸친 하나의 역학에 의해 발생할지 모른다는 학설이 발표되었다(Pang *et al.*, 1992).

이 학설은 이 해역의 해수순환을 두 순환계로 구분하였다. 하나는 쿠로시오해류에서 분리되어 동중국해로 북상한 후 대한해협으로 흐르는 대마난류로 이 해역에서 가장 강하고 년중 유지되는 1차순환이며, 다른 하나는 황해를 중심으로 발생하는 순환으로 계절에 따라 순환의 방향이 바뀌고 흐름이 매우 약한 2차순환이다. 2차순환의 역학은 황해의 양 연안에서는 바람방향의 순풍류가 발생하며 중앙의 골을 따라서는 바람방향과 반대의 역풍류가 발생하는 것이다(Csanady, 1982). Fig. 1은 이러한 역학에 의해 발생할 수 있는 해수순환의 단순모식도(Pang *et al.*, 1992)로 황해와 동중국해의 해수순환의 계절변화를 보여준다. 여름철에는 남풍에 의해 해수가 황해의 양 연안을 따라 북상

하고 중앙골을 따라 남하하며, 겨울철에는 북풍에 의해 해수가 황해의 양 연안을 따라 남하하고 중앙골을 따라 북상한다. 이 순환에 의해 황해의 중앙골을 따라 여름철에는 황해저층냉수가 남하하고 겨울철에는 황해난류가 북상하는 계절순환이 발생한다는 것이다.

이 학설이 제시하는 역학은 Park(1986)에 의해 처음으로 황해에 정성적으로 적용되어 졌고, Pang(1987)과 Hsueh and Pang(1989) 등에 의해 황해에서 실제 바람에 의한 해수의 흐름을 정량적으로 계산할 수 있는 방법이 마련되었으며 그 후 보다 실제적인 해안선을 적용하여 관측된 해류를 재현시키는데 진전이 이루어진 상태이다(Pang, 1992). 관측된 해류는 1983년 1월에서 4월까지 황해의 골을 중심으로 관측된 자료로서 겨울철 북풍계 바람에 의한 역풍류가 뚜렷이 나타나 있다(Hsueh and Pang, 1989). 국립수산진흥원의 자료 중 1970~1979년 10년간 제주도 주변해역의 특성자료를 수괴분석한 결과에는 겨울철에 고온고염계의 해수가 소혹산도 이남의 해역을 통해 황해로 연결되고 서해안에는 황해냉수가 소혹산도 부근까지 남하하

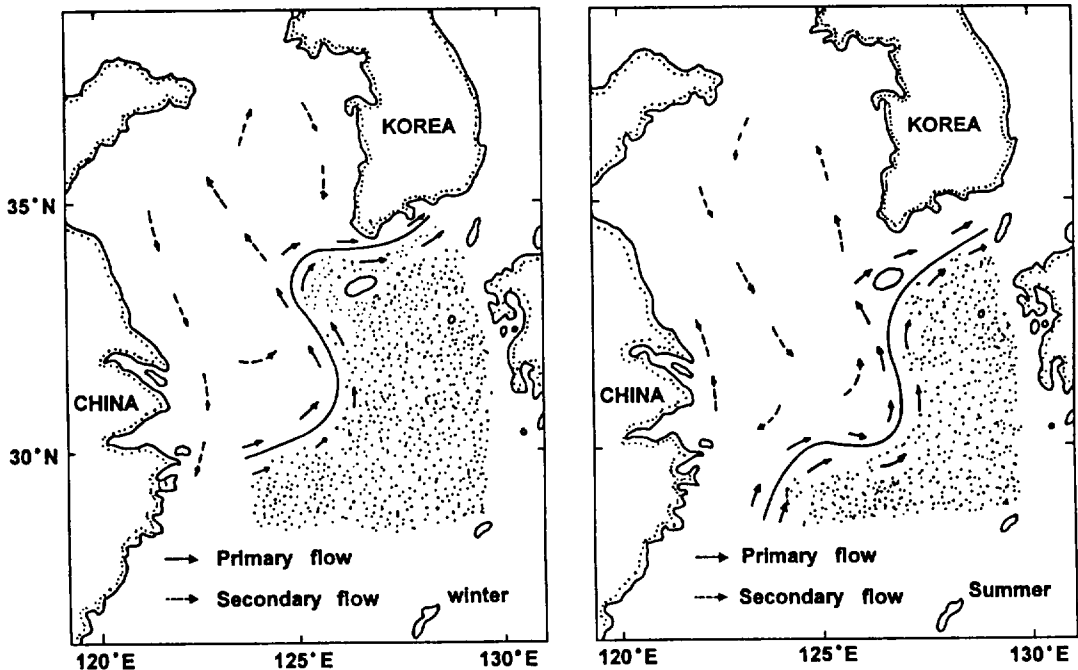


Fig. 1. Schematic seasonal circulation diagram of the Yellow Sea and the East China Sea in winter and summer. (In primary flow, only flow along the boundary of Tsushima water is drawn.)

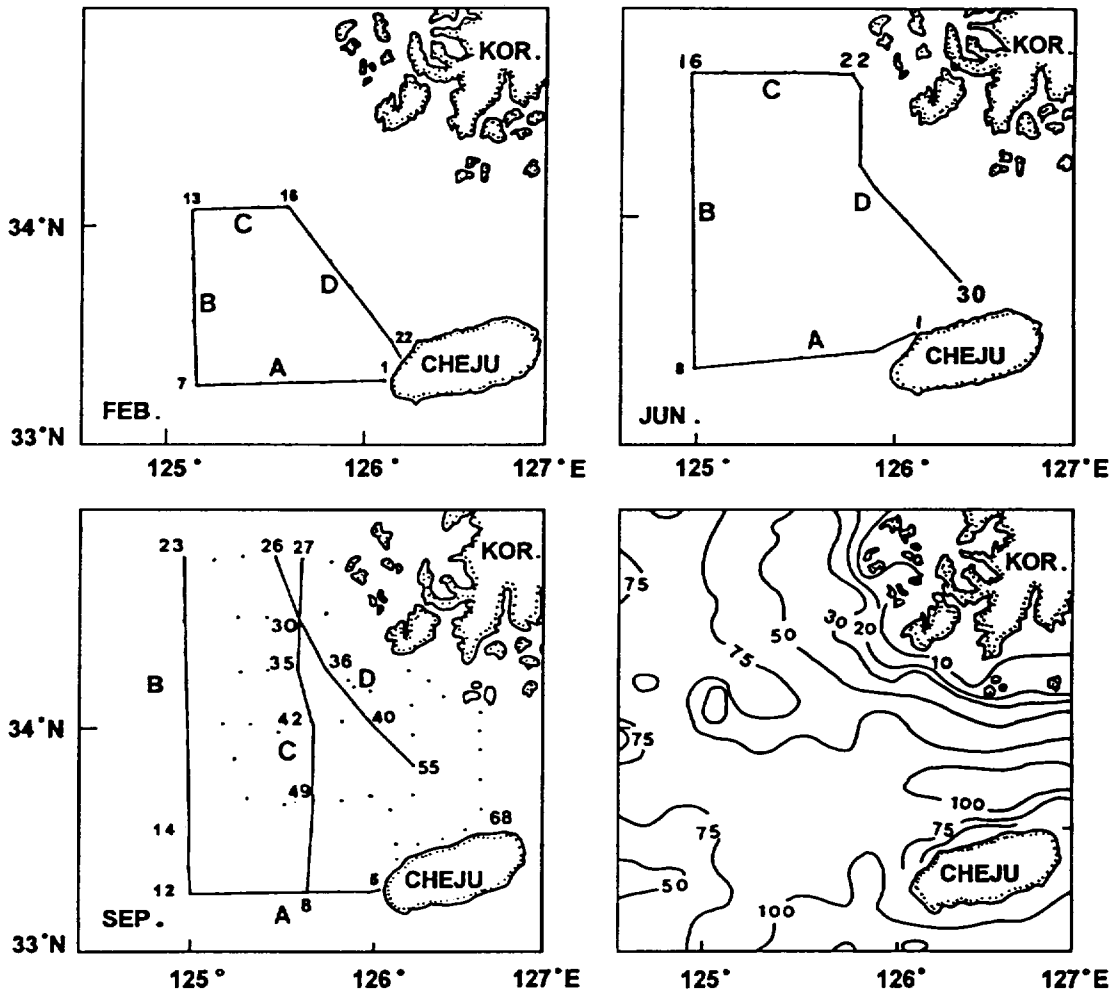


Fig. 2. Observation stations in the northwestern sea of Cheju-do in Feb. 17~18, Jun. 20~22, and Sep. 6~15, 1994, and bathymetry in m.

여 확장된다. 여름철에는 겨울철과 반대로 황해저층냉수가 황해 중앙부를 통해 남하하여 고온고염계의 해수를 남서방향으로 후퇴시키는데 비해 서해연안에는 혼합수와 연안수가 고위도까지 분포한다(Rho, 1985). 이 수괴분석의 결과는 Fig. 1의 단순모식도와 일치함에도 불구하고 지금까지 관측된 많은 해수특성분포에서는 제주해협을 따라 제주연안과 남해연안에 강한 염분전선이 형성되어 여름철에 고염계의 난류수가 황해로 유입되지 못하는 양상을 보여준다(Lie, 1984, 1985; Nakao, 1977; Kim *et al.*, 1991). 이러한 차이점이 발생하

는 원인과 과연 여름철에 고염계의 난류수가 서해연안을 따라 황해로 유입될 가능성이 있는가의 문제는 황해해수순환을 알기 위해 우선적으로 해결해야할 문제이다.

이 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 계절순환의 구조에서 가장 중요한 해역인 제주도 북서해역에서 겨울철과 여름철에 CTD 관측을 하였으며 해수분포의 계절변화를 분석하여 해수순환의 계절변화를 살펴보았다. 특히 여름철 저온현상 해역으로 알려진 한반도 남서연안해역의 자료를 분석하여 여름철 황해난류수가 황해로 유입될 수 있

는지의 문제를 살펴보았으며 앞에서 말한 차이점의 원인을 찾아 보았다. 관측해역과 수심 그리고 관측점은 Fig. 2에 표시되었으며 관측시기는 각각 1994년 2월 17~18일, 6월 20~22일, 9월 6~15일이었다. 이 중 9월은 제주도 동쪽해역까지 관측하였으며 관측점은 Fig. 3과 같다. 제주도 동쪽해역의 자료는 수괴특성의 변화를 보기 위하여 수괴분석할 때만 사용하였으며 특성분포에는 관측점 68가지의 자료만 사용하였다. 겨울철은 계절순환을 발생시키는 북서풍이 강하고 해황이 단순하기 때문에 2월의 대표값으로 충분하지만, 여름철은 계절순환을 발생시키는 남동풍이 약하고 해황이 복잡하기 때문에 여름이 시작되는 6월과 늦여름인 9월 두 번을 관측하였다.

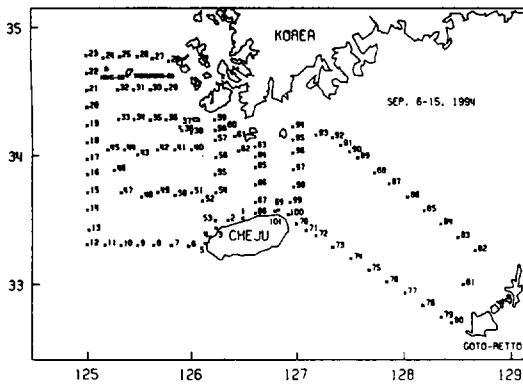


Fig. 3. Observation stations in Sep. 6~15, 1994. Stations 1~68 are marked in Fig. 2

수괴 분석

Fig. 4는 2, 6, 9월 관측된 CTD 연속자료를 수심 1 m 간격으로 계산하여 나타낸 T-S diagram과 이들을 합쳐 나타낸 T-S diagram이다. 2월에 관측해역의 수괴들은 T-S diagram에 거의 직선상에 나타나 이들이 고온고염수와 저온저염수의 혼합에 의해 생성된 수괴들이라는 것을 보여준다. 그러므로 이 시기의 수괴들은 고온고염의 대마난류수, 저온저염의 황해냉수, 그리고 이 두 수괴와의 혼합수로 크게 세가지 수괴로 구분될 수 있다. 이 중에서 대마난류수는 T-S diagram에서 뚜렷하게 한 무리를 형성하고 있으며 그 범위는 약 13.0 °C 이상, 34.5 ‰ 이상이다. 황해냉수의 특성은 8.0 °C,

33.0 ‰까지 낮은 값으로 고온고염의 난류수의 영향을 받지 않고 겨울철에 황해에서 형성된 해수이며, 혼합수 특성의 범위는 대마난류수와 구별되는 상한선이 12.5 °C 이하, 34.4 ‰ 이하로 뚜렷하지만 황해냉수와 구별되는 하한의 경계는 구분할 기준이 뚜렷하게 보이지 않는다. 혼합수는 수평분포 (Fig. 5)에서 나타나는 바와같이 겨울철에 황해로 유입하는 해수의 특성에 해당하기 때문에 이 논문에서는 황해난류수로 구분하였다. 황해냉수와 황해난류수의 특성은 T-S diagram 상에서 구분되는 무리를 형성하지 않고 연속으로 나타나기 때문에 특성값으로 구분할 기준은 뚜렷하지 않지만 6월의 T-S diagram을 보면 10.0 °C~33.4 ‰ 이하의 수괴는 2월과 비슷한 특성을 유지하고 있기 때문에 이 특성값을 황해냉수와 황해난류수의 경계값으로 볼 수 있다. 그러므로 겨울철에 황해난류수의 특성은 10.0~12.5 °C, 33.4~34.4 ‰에 해당한다.

6월에는 2월에 나타나는 해수 중 9.0 °C 이하, 33.0 ‰ 이하의 황해냉수들은 나타나지 않았다. 이는 저온저염의 황해냉수가 겨울철이 지났기 때문에 중 저층에서 사라지고 저층의 황해(저층)냉수는 아직 이 해역으로 확장되지 않았기 때문이다. 34.5 ‰ 이상인 고염의 대마난류수는 이미 제주도 북서해역으로는 유입되지 않고 있으며, 황해난류수는 2월의 특성값이 그대로인 부분이 있기는 하나 전반적으로 이 시기에 나타나는 표층의 고온저염의 해수와 혼합되어 저염화되었다. 그러므로 이 시기의 특성은 2월과는 대조적으로 저온고염에서부터 고온저염으로 연결되어 나타난다. 이 시기의 고온저염의 표층수는 31.3 ‰로 떨어져 이미 양자강 연안수의 영향이 나타남을 알 수 있다.

9월에는 6월에 보이지 않았던 8.0~9.0 °C, 33.0 ‰ 이하의 저온저염수가 다시 나타난다. 이는 황해저층냉수가 여름철에 이 해역으로 확장된 결과이다. 이 외의 2월에 나타났던 특성들은 전반적으로 수온이 1.0~2.0 °C 정도 높아져 저층수를 형성하고 있으며, 표 중층수들과 함께 T-S diagram 상에 크게 세무리를 형성하고 있다. 가장 오른쪽에 세로로 나타나는 고염의 무리는 약 28.5 °C~34.0 ‰에서 15 °C~34.6 ‰로 이어지는 수괴로서 이 수괴들은 일본에 가까운 해역에 분포하는 대마난

제주도 북서해역의 해수분포의 계절변화와 여름철의 황해난류

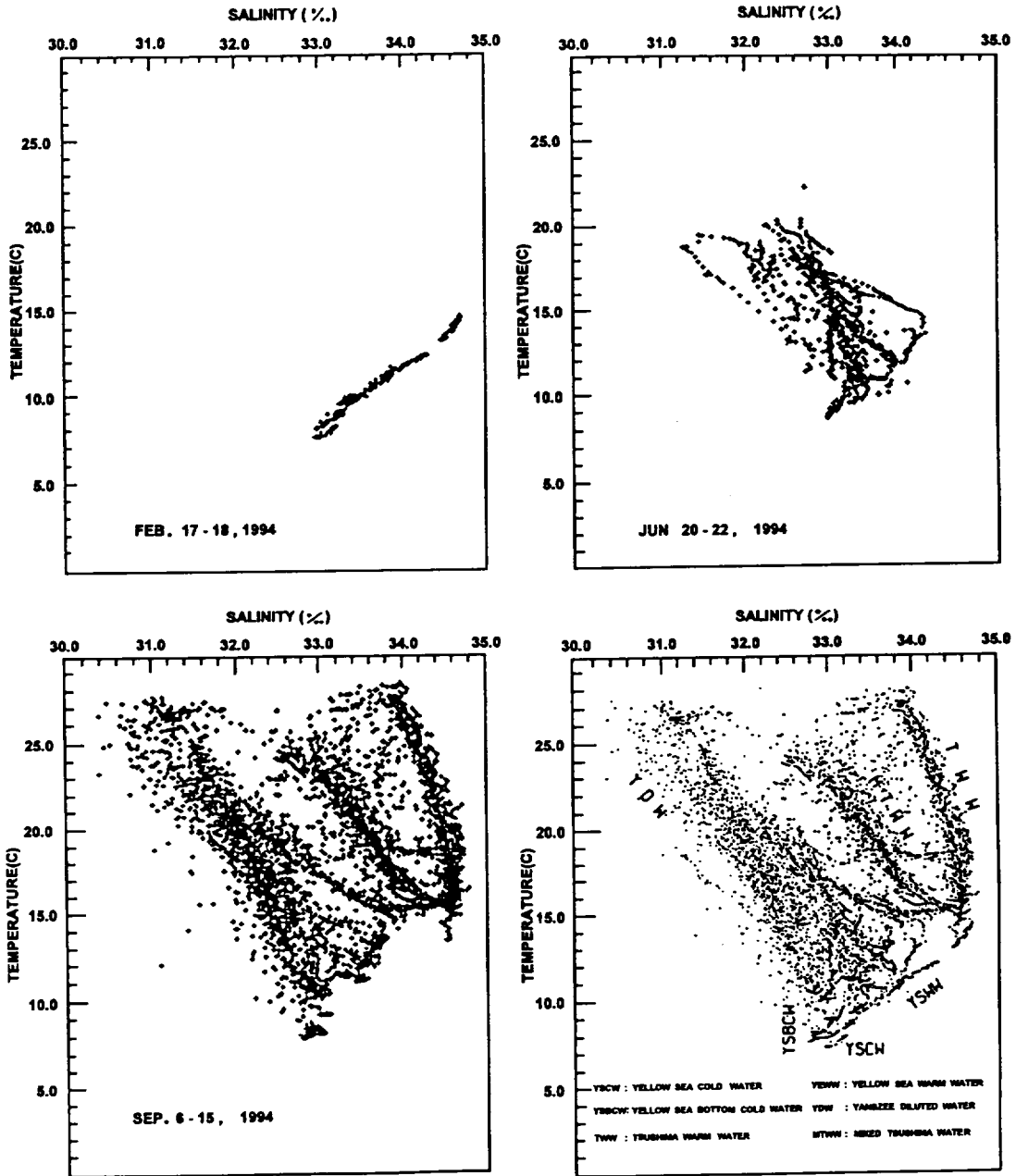


Fig. 4. T-S diagrams of Feb. 17~18, Jun. 20~22, Sep. 6~15, 1994, and all data.

류수이다. 중간층의 무리는 저층의 특성이 대마난류 수의 저층특성과 연결되어 대마난류가 다른 해역을 지나며 혼합에 의해 생성된 수괴임을 보여준다. 이 수괴는 좌우의 두 무리와는 확실히 구분되어 두

무리와의 혼합에 의해 생성된 것은 아님을 알 수 있다. 관측점이 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 어느 해역에 편중되지 않고 비교적 고르게 분포하며 자료의 수심이 1 m 간격인 것으로 미루어 볼 때, 이

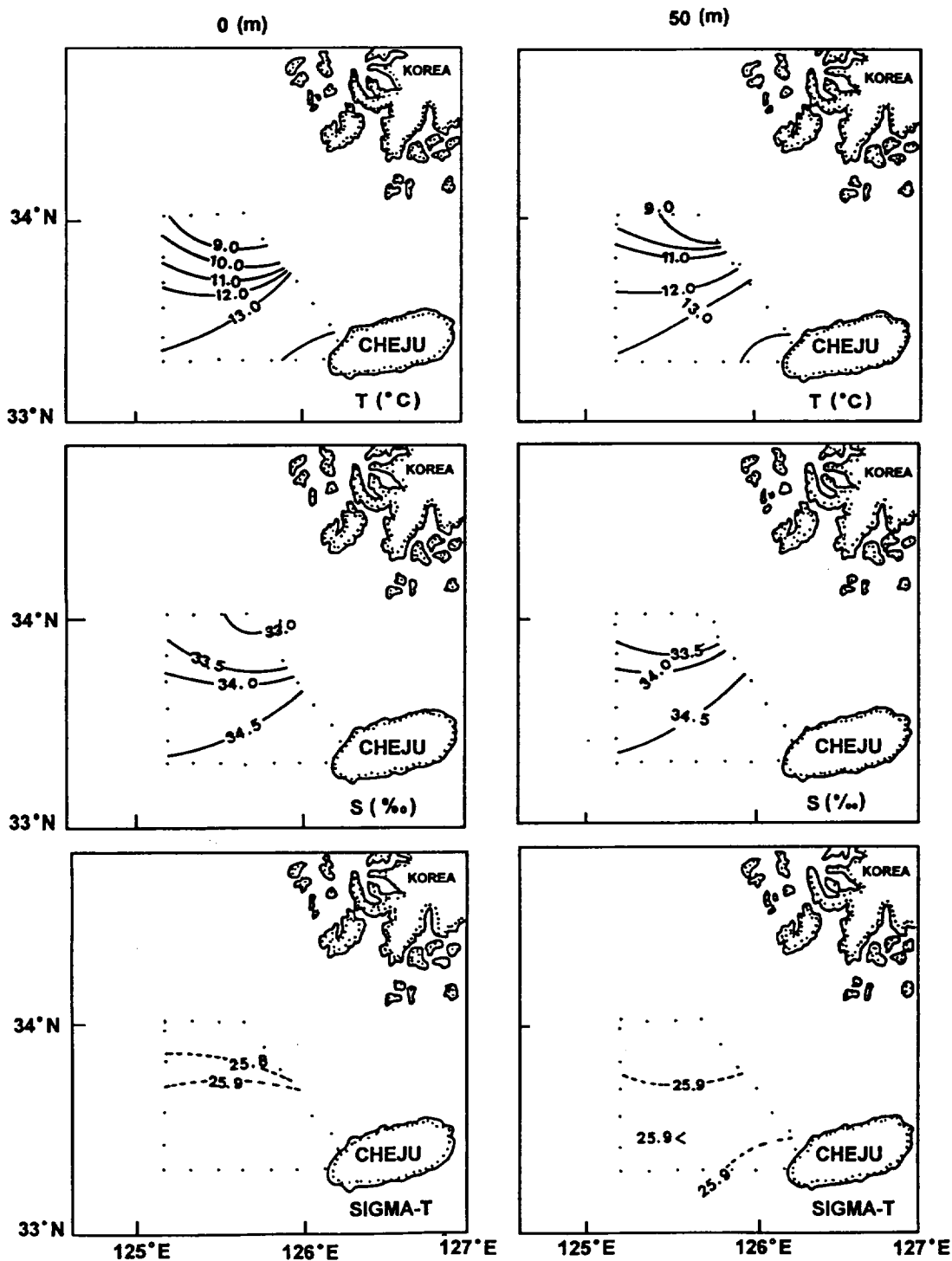


Fig. 5. Horizontal distributions of temperature, salinity, and sigma-t on the depth of 0 m and 50 m in Feb. 17~18, 1994.

수괴가 다른 수괴의 무리와 분리되어 있다는 것은 이 수괴가 관측해역에 유입되기 전에 이미 대마난류 본류수와는 다른 경로로 북상하며 독립된 수괴를 형성했다는 것을 보여준다. 이 수괴들은 제주도 연안해역 중 동쪽해역에 주로 분포한다. 제주도 서쪽과 북쪽해역에서는 제주도에 아주 가까운 해역에만 분포하여 황해나 우리나라 남해안과는 연결되지 않기 때문에 황해난류수로 볼 수 없다. 이 논문에서는 이 수괴를 대마난류혼합수로 분류하였다. 이 수괴가 다른 수괴와 항상 분리되어 존재하는지는 알 수 없지만 관측결과는 쿠로시오계 해수의 일부가 대마난류와 분리되어 다른 경로를 통해 북상할 가능성을 보여준다. 가장 왼쪽에 무리진 수괴는 저층의 황해난류수 또는 황해저층냉수가 표층의 양자강연안수인 고온저염수와 혼합되어 형성된 것이다. 이 무리는 대마난류혼합수의 서쪽이나 북쪽의 가장자리 분포하는 여러 수괴들이다. 겨울철에 나타났던 황해난류수의 특성은 표층수와 황해저층냉수와 혼합되어 특성이 저염화되었다. 그러나 어느 특성값이 황해난류수의 경계값인지는 T-S 분포만으로는 알 수 없으며 수평분포에서 황해로 연결되는 난류수값으로 구분되어야 할 것이다.

이상과 같이 관측해역에 나타난 수괴들은 대마난류수(Tsushima Warm Water, TWW), 대마난류혼합수(Mixed Tsushima Warm Water, MTWW), 황해난류수(Yellow Sea Warm Water, YSWW), 황해냉수(Yellow Sea Cold Water, YSCW), 황해저층냉수(Yellow Sea Bottom Cold Water, YSBCW), 양자강연안수(Yangzee Coastal Water, YCW)와 기타 연안수들이다. Fig. 4에는 이들이 T-S diagram 모두 합쳐져 그려져 있다. 이 수괴들을 특성값으로 구분하는 것은 쉽지 않다. 황해냉수와 황해난류수 같이 특성이 연결되어 그들의 경계값을 정하기가 쉽지 않을 경우가 있으며 대마난류혼합수와 황해난류수 같이 분리되어 있으나 염분값이 겹치는 경우도 있기 때문이다. 따라서 지금까지 이 해역의 수괴를 구분하는데 가장 많이 사용되어 왔던 염분값으로 수괴를 분석하는 방법에는 한계가 있게 된다. 많은 경우에 이 문제를 해결하기 위하여 수심 50 m 이하 층만을 사용하여 분석하였으나 그럴 경우 대마난류 혼합수는 분리되어 나타나지 않는다.

해수분포의 계절변화

2월의 해수분포

Fig. 5는 2월에 표층과 50 m층에서 수온 염분 밀도의 수평분포들이며, Fig. 6은 2월 관측단면 A-D를 따른 수온 염분 밀도의 수직분포들이다. 이 분포들은 겨울철에 해수가 수직적으로 거의 균일한 분포를 하고 있다는 것을 보여준다. 13.0 °C~34.5 ‰ 이상의 대마난류수는 제주도 연안역을 중심으로 제주도 서방해역에서 제주해협으로 연결되어 분포하고 있어 대마난류수가 제주도 서방해역을 거쳐 모두 제주해협으로 유출됨을 알 수 있다. 10 °C~33.4 ‰ 이하의 황해냉수는 B단면을 중심으로 소혹산도 이남해역까지 자리잡고 있으며, 10.0~12.5 °C, 33.4~34.4 ‰의 황해난류수는 대마난류수와 황해냉수 사이에 분포하고 있다. B와 D 단면의 수직분포는 대마난류수와 황해냉수가 남북으로 대치하고 있는 사이에 황해난류수가 분포해 있는 상황을 보여준다. 이러한 분포는 T-S diagram에 나타났듯이 황해난류수가 독자적인 기원을 가진 수괴가 아니라 대마난류수와 황해냉수의 혼합으로 형성된 수괴라는 것을 설명해 준다.

황해난류수의 분포를 보면 D단면에서는 좁게 분포하고 B단면에서는 남북으로 넓게 분포하는데 이 분포는 두 가지의 의미를 갖고 있다. 하나는 황해난류수가 B단면 서쪽해역으로 보다 폭넓게 확장되어 황해로 연결되는 것이며, 다른 하나는 D단면에서 황해냉수가 대마난류수를 남쪽으로 압박하고 있다는 것이다. 이러한 압박은 여름철의 분포와 비교하면 쉽게 알 수 있다. 황해냉수와 황해난류수의 경계선의 방향이 약간 북서-남동방향으로 기울어져 있다는 것이 이러한 경향을 뒷받침해 준다. 황해냉수의 압박은 남하를 의미하는데 이 압박은 전선으로 나타난다. 두 수괴 사이의 전선은 수온과 염분 모두에서 보이며 밀도에서도 나타난다. 그러므로 이 전선은 여름철에는 나타나는 전선과는 다르다. 여름철의 전선은 수온전선과 염분전선이 나타나는 해역이 다르다. 다시말해 여름철의 전선은 국지적인 특정한 영향에 의해 나타나는 전선인데 반해 겨울철의 전선은 수괴간의 압박에 의해 나타나는 전선이다. 그리고 이 압박은 황해냉수의 남하에 의한 것이다.

이러한 압박으로 인해 전선역에는 겨울철에 수

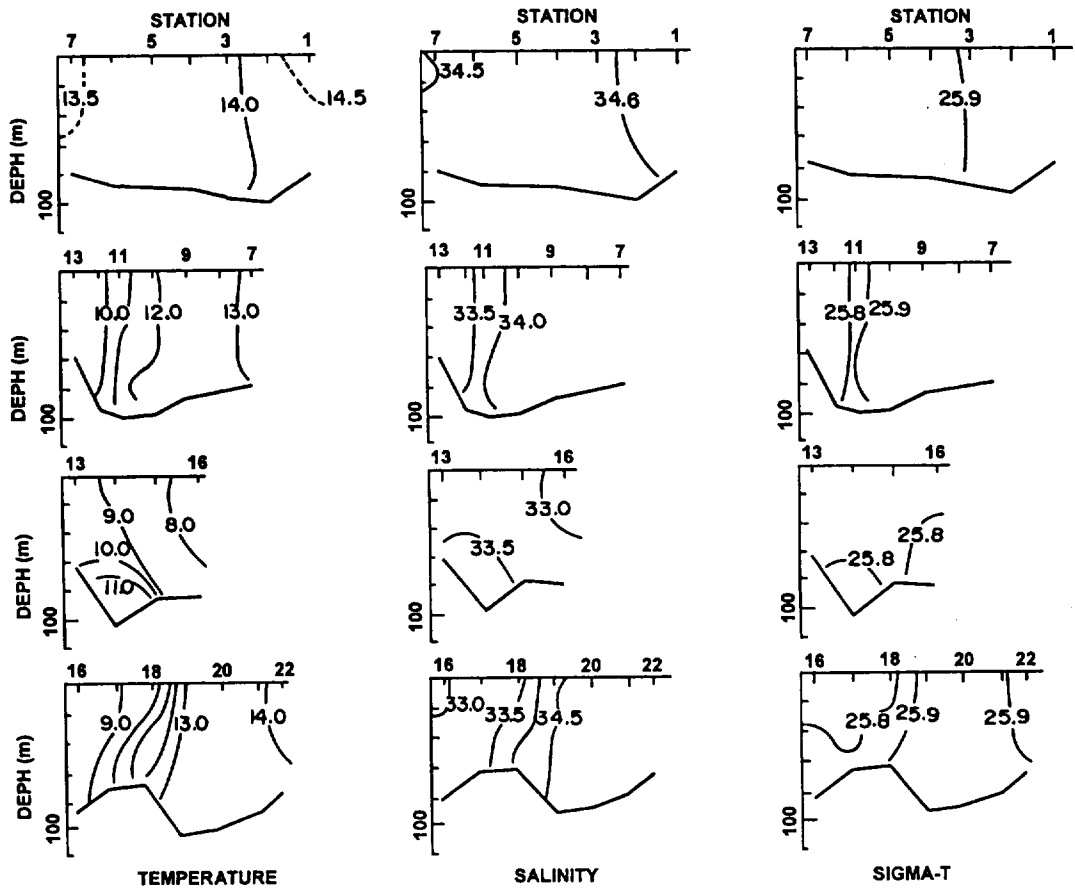


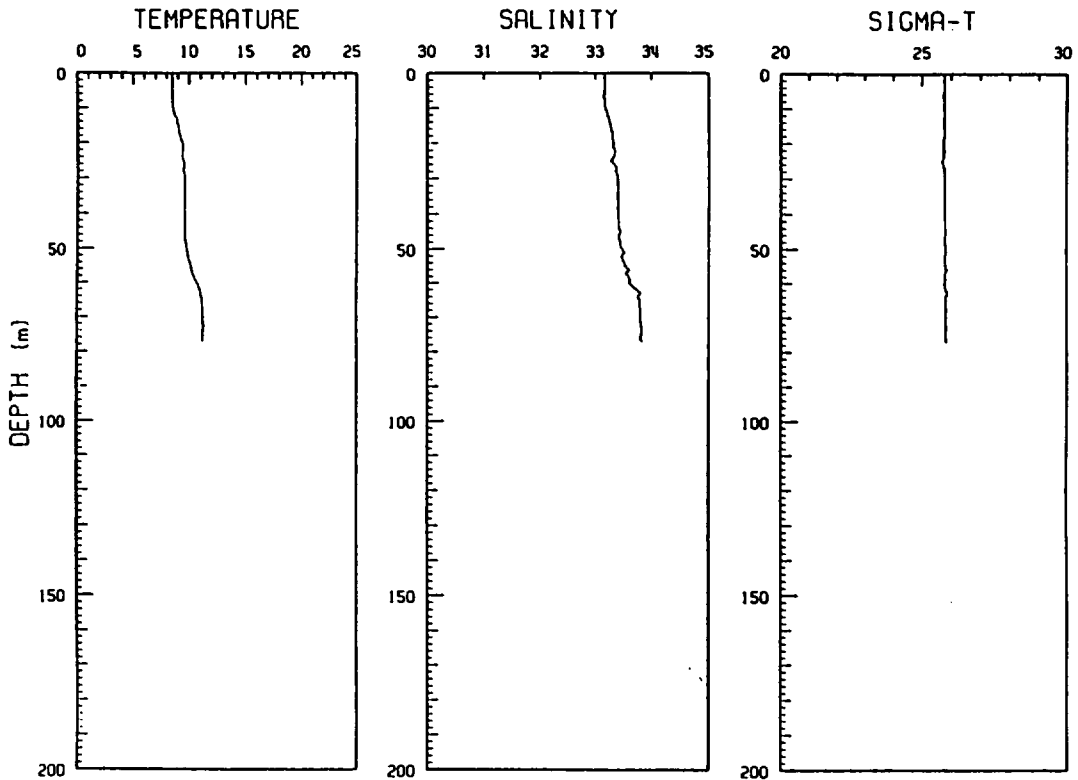
Fig. 6. Vertical distributions of temperature, salinity, and sigma-t along A, B, C, and D Lines shown in Fig. 2 in Feb. 17~18, 1994.

온역전이 발생한다. 수온역전은 단면 C의 분포에서 잘 나타난다. 단면 C에서는 저층의 끝에 고온의 해수가 있으며 상층에는 저온의 해수가 분포한다. 그러나 이 수직분포는 밀도로는 역전이 아니다. Fig. 7은 관측점 14의 수직 수온 염분 밀도(t) 분포인데 수온은 역전되어 있으나 밀도는 수온역전이 염분에 의해 상쇄되어 수직적으로 거의 중립(neutral)인 상태를 보여준다.

6월의 해수분포

Fig. 8은 6월에 표층과 50 m층에서 수온 염분 밀도의 수평분포이고, Fig. 9는 6월 관측단면 A-D를 따른 수온 염분 밀도의 수직분포이다. 6월에는 2월과는 달리 성층이 이루어지기 때문에 표층의

분포와 저층의 분포가 다르다. A단면을 보면 약층이 형성되어 상층과 하층이 구별되며 상층에는 양자강연안수가 전 단면에 분포한다. 하층에는 동쪽에 황해난류수가 서쪽에 황해저층냉수가 분포하며 대마난류수는 보이지 않는다. 제주도 연안에서는 등온선이 저층을 향해 굽어져 있는데 이것은 고온의 해수가 연안을 따라 북으로 흘러가는 것을 보여준다(제주도 연안의 표층수온이 외해의 표층수온 보다 높아 수직혼합에 의한 것은 아님). 황해난류수의 분포범위가 황해저층냉수에 의해 제한되고 있는 것은 겨울철과 비교해 대조적이다. B단면의 상층에는 양자강연안수가 저층에는 황해저층냉수가 분포하는데 북쪽으로 갈수록 양자강연안수의 영향이 약화되고 황해저층냉수의 영향이 강화됨을 볼 수 있다. 그러므로 여름철에는 B단면을 통해서



ST. NO:14 (125 19.00 E, 34 1.50 N) in FEB. 17-18, 1994

Fig. 7. Vertical profiles of temperature, salinity, and sigma-t on station 14 in Feb. 17~18, 1994.

황해난류수가 황해로 연결될 수 없는 형태이다.

C단면에는 특이한 모양이 나타난다. 관측점 19 이서의 해역에는 다른 해역과 같이 상 하층의 성층이 이루어 지고 있는데 반해 이동의 해역에는 전 수심에서 균일한 분포를 하고 있다. D단면을 보면 이러한 균일한 분포는 관측점 25 이남의 해역에서는 사라지고 다시 성층이 이루어진다. 상 하층이 균일한 특성을 보이는 해역은 여름철 이상저온현상이 나타난다고 보고된 한반도 남서해역이다(김·강, 1983; 강, 1979).

이러한 상·하층의 혼합으로 수평분포는 표층과 50 m층이 아주 다른 형태를 보여 준다. 표층 수온 분포에서는 대흑산도 부근의 해수가 황해 중앙부의 찬 해수와 연결되는데 비해 50 m층의 수온 분포에서는 대흑산도 부근의 해수가 황해 중앙부와 연결된 것이 아니라 오히려 외해와 연결된 것으로 나타난다. 염분분포는 수온분포와도 다르며 표층은 양자강연안수의 영향으로 저염의 해수가 남서

해역에서 제주해협으로 향하고 있으며, 50 m층에서는 오히려 북서방향인 황해쪽으로 갈수록 염분이 낮아지고 있다. 밀도는 염분보다는 수온에 의해 많이 결정되는 듯이 보이지만 수온과 염분분포의 차이 때문에 또 다른 분포를 보인다.

9월의 해수분포

Fig. 10은 9월에 표층과 50 m층에서 수온 염분 밀도의 수평분포이고, Fig. 11은 9월 관측단면 A-D를 따른 수온 염분 밀도의 수직분포이다. 9월의 분포들도 6월과 마찬가지로 층별로 특성분포들이 다르다. 표층수온분포에서는 한반도 남서연안의 저온수와 제주도 서방해역의 고온수가 분리되는데 비해, 50 m층의 분포에서는 두 해역이 연결된다. 표층의 염분분포에서는 양자강과 가까운 해역의 염분이 가장 낮으며 먼 해역으로 갈수록 높아지는 분포인데 비해, 50 m층의 분포에서는 황해해역이 가장 낮으며 황해에서 멀어질수록 염분이 높아지

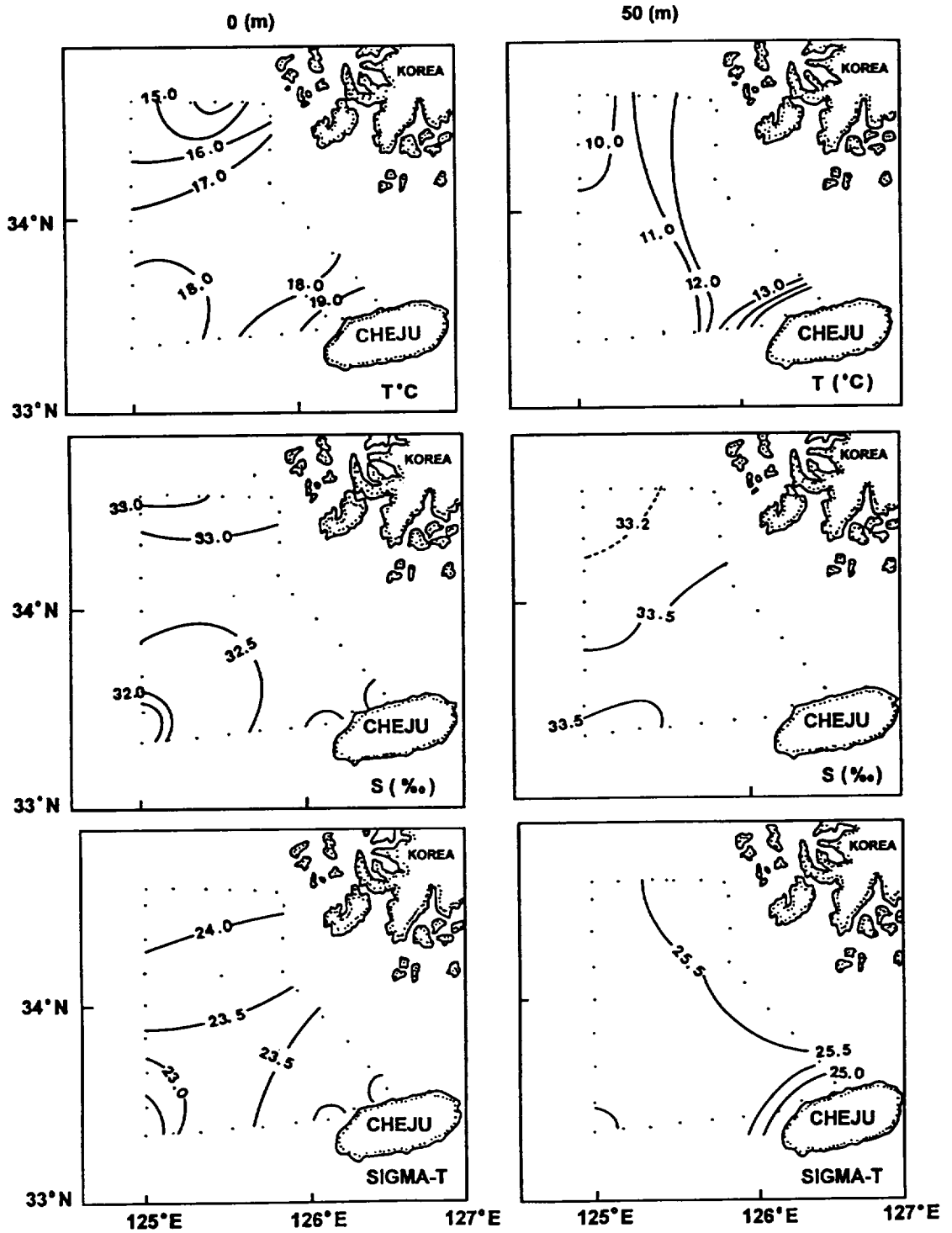


Fig. 8. Horizontal distributions of temperature, salinity, and sigma-t on the depth of 0 m and 50 m in Jun, 20~22, 1994.

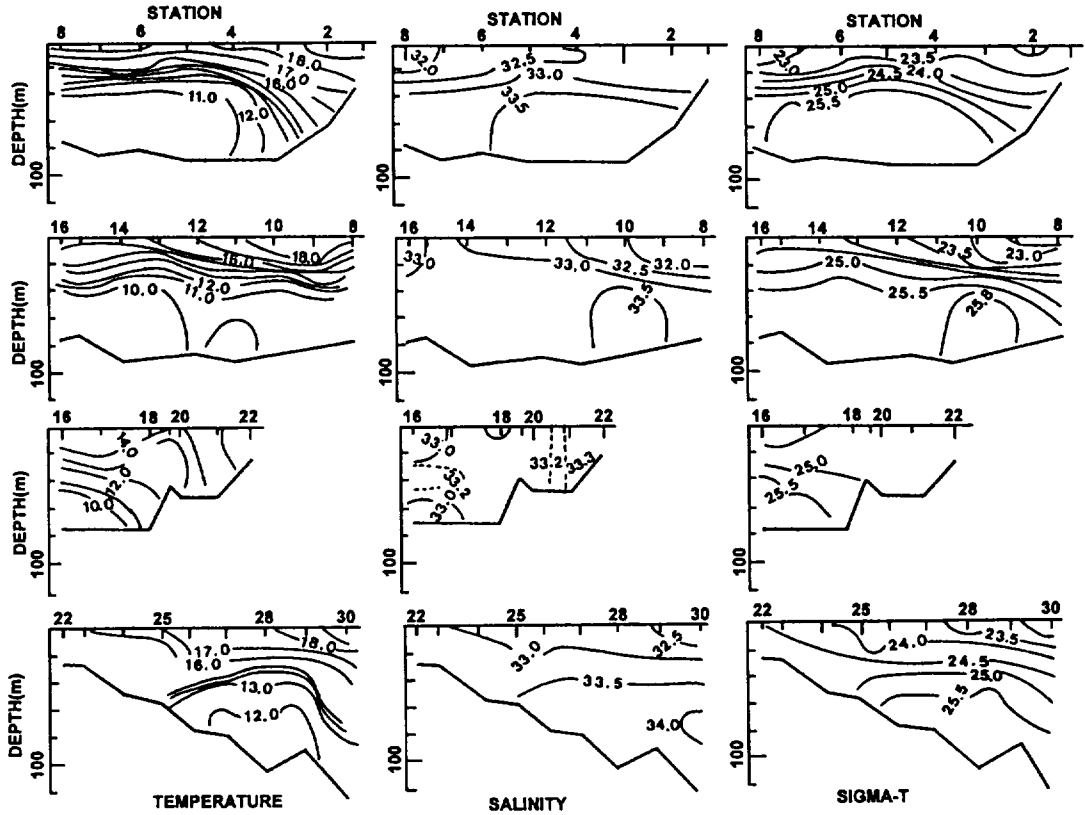


Fig. 9. Vertical distributions of temperature, salinity, and sigma-t along A, B, C, and D lines shown in Fig. 2 in Jun. 20~22, 1994.

는 분포를 보인다. 이와같은 분포는 6월의 분포와 기본적으로 같은 구조로 여름철의 구조가 유지됨을 보여준다.

6월과 9월 모두 같은 구조를 보이는 것은 저층에서 제주도 서방해역의 황해난류수가 서해안으로 연결되는 것이 일시적인 현상이 아니라는 것을 의미한다. 두 해역의 연결은 우선은 한반도 남서해역의 수직혼합에 기인한다고 볼 수 있다. 수직적으로 수온은 상고하저(上高下低)이며 염분은 상저하고(上低下高)이다. 그러므로 수직혼합으로 표층수의 수온은 낮아지고 저층수의 수온은 높아지며, 표층 염분은 높아지고 저층염분은 낮아지게 된다. 그러므로 수직혼합의 효과로 표층의 수온은 낮아져 황해해수와 연결되는 반면 50 m층의 수온은 높아져 제주도 서방해역의 고온수와 연결된다. 반면에 염분은 표층이 높아지고 50 m층은 낮아져 오히려 황해해수와 연결된다. 그러므로 수온분포에서 황

해난류수가 서해안으로 연결되는 형태가 과연 수직혼합에 의한 것인지 아니면 황해난류수의 유입에 의한 것인지는 여름철 해수순환에서 매우 중요하다.

하계 한반도 남서연안의 저온현상해역과 해수분포

해수분포에서 살펴본 바와같이 여름철에 한반도 남서해역에는 표층저온이 뚜렷하게 나타나 있다. 이러한 저온현상은 이 해역의 해수가 황해의 찬물을 공급받고 있다는 생각을 갖게 만든다. 이 해역의 해수가 황해냉수에서 공급되었다면 (강, 1979) 여름철에 고염계의 난류수가 황해로 유입될 가능성은 없어진다. 여름철에 황해난류수는 제주도 연안 가까이에서만 분포하며 서쪽에는 황해저층냉수가 폭넓게 자리잡고 있기 때문에 소혹산도 이남해역을

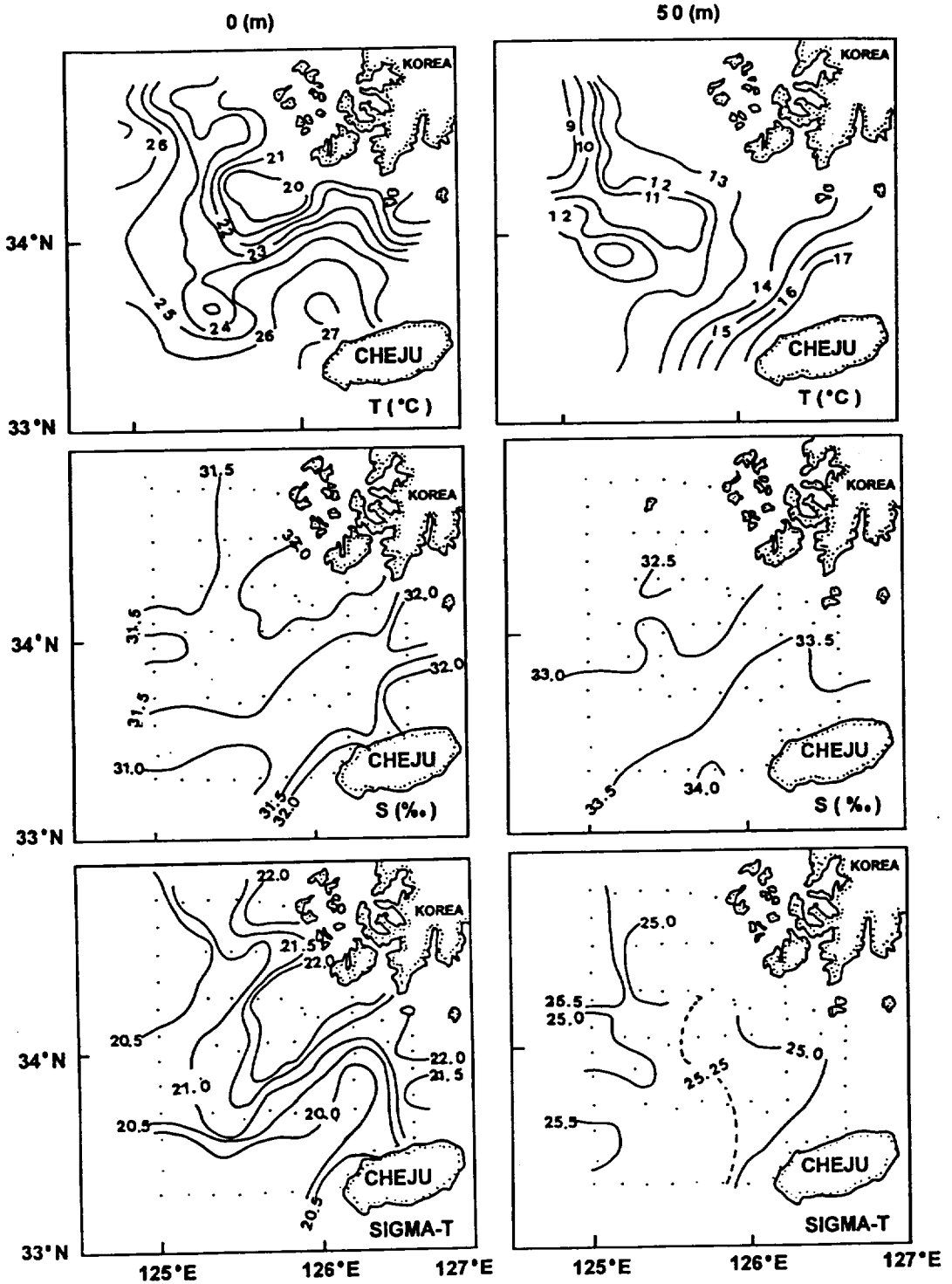


Fig. 10. Horizontal distributions of temperature, salinity, and sigma-t on the depth of 0 m and 50 m in Sep. 6~15, 1994.

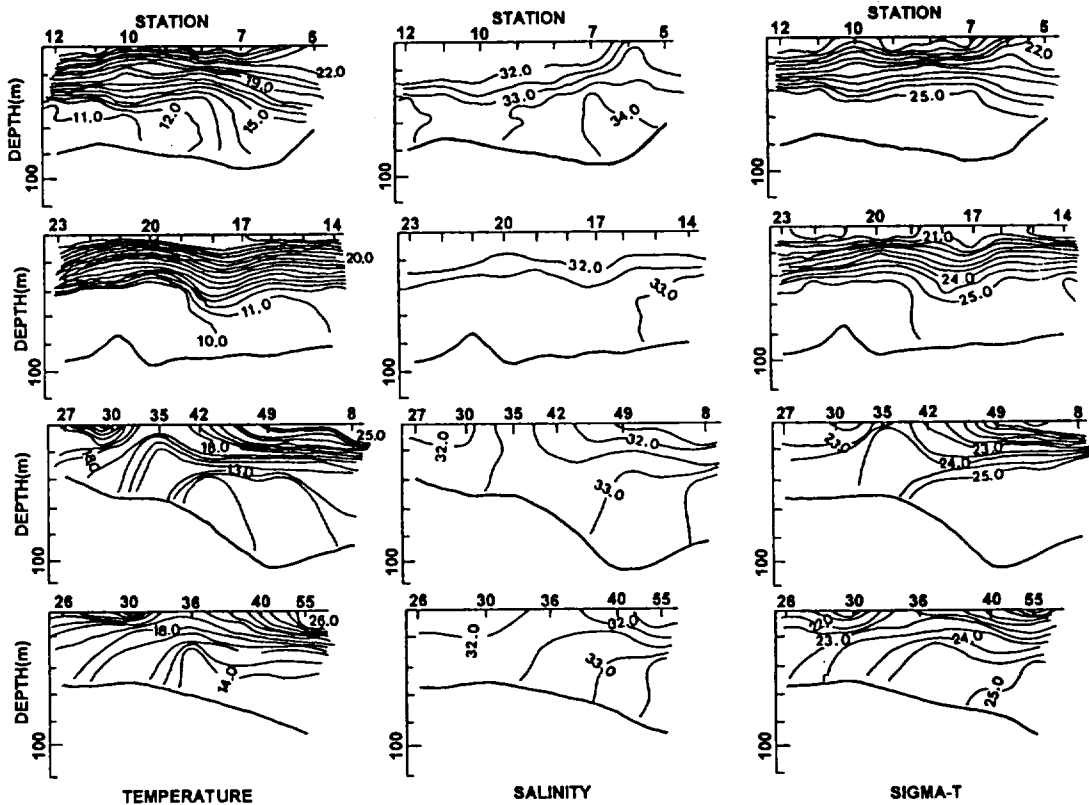


Fig. 11. Vertical distributions of temperature, salinity, and sigma-t along A, B, C, and D lines shown in Fig. 2 in Sep. 6~15, 1994.

통해 황해로 연결될 수는 없다. 그러므로 여름철에 고염계의 해수가 황해로 유입될 수 있는 유일한 통로는 서해연안을 따라 유입하는 것이다. 이러한 추론이 가능한 이유는 여름철 황해의 염수지를 위해서는 고염계의 해수공급이 필요하기 때문이다. 즉, 고염수의 공급이 전혀 없다면 황해표층의 염분은 수직혼합을 고려하더라도 더욱 낮은 값을 나타내야 하는 것이다. 황해에는 여름철에 모든 방면에서 고염계 해수의 유입이 막히기 때문에 여름철에 황해로 유입되는 막대한 하천수나 강수량으로 인해 염분의 유지가 불가능하다. 황해의 여름철 염분을 유지하기 위해서는 어디로든 고염계 해수의 유입이 필요하며 그 통로는 한반도 서해안 밖에는 없다.

여름철의 수온관측결과는 이 문제의 해답을 제시해 주고 있다. 6월의 수직수분포(Fig. 9)를 보면 관측점 18의 해수기둥은 대부분 13.0 °C 이하임에 비해 관측점 21의 해수기둥은 모두 14.0 °C 정도의

수온을 가지고 있기 때문에 관측점 18의 해수기둥이 수직혼합될 경우 관측점 21의 수온을 가질 수는 없다. 관측점 18은 황해저층냉수분포의 경계해역이며 관측점 21은 대륙산도와 서해안의 중간지점으로 황해난류수가 북상한다면 통과해야 할 해역이다 (Fig. 8). 수직염분분포를 보면 이러한 추론이 더욱 명확해진다. 관측점 21의 해수기둥의 염분은 33.3 ‰ 이상인데 비해 황해저층냉수역의 해수기둥은 대부분 33.0 ‰ 이하이기 때문에 황해저층냉수역의 해수로는 만들 수 없는 염분이다. 이것은 관측점 21이 하천수의 영향을 많이 받고 있는 해역이라는 점을 감안하면 더욱 확실해진다. 관측해역 보다 북쪽의 해역에서는 일반적으로 염분값이 낮아지기 때문에 이러한 고염이 관측해역 이북의 해수에 의해 공급받았다고는 생각할 수도 없으며, 반드시 이남해역의 고염수에 의해 공급받음으로써 만이 가능하다.

9월의 결과는 6월처럼 명확하지는 않다. 수온인

경우는 황해저층냉수 해역이나 대륙산도와 서해안 사이의 해역 모두 상층수온이 매우 높아져 두 해역의 차이가 눈으로 보아서 확연히 나타날 정도로 크지 않으며, 염분인 경우는 여름철에 하천수의 영향이 강해 서해연안 해역이 매우 저염화되기 때문이다. 그러므로 9월은 6월과는 다른 방법으로 분석해 보았다. 각 해역의 해수들이 수직으로 모두 혼합되는 경우의 평균 특성값을 계산한다면 한반도 남서해역으로 연결되는 해수분포를 찾을 수 있을 것이다. Fig. 12는 표층부터 70 m 층까지 모두 혼합되었을 경우 수직평균 수온과 염분의 수평분포를 보여준다. 이 때 수심이 알아 관측이 70 m보다 얕은 수심까지만 관측이 되었을 경우에는 표층부터 관측된 최대수심까지를 사용하였다.

평균수온분포에서는 제주도 서방해역의 고온수가 한반도 남서해역을 통해 서해안을 따라 연결된다. 이것의 의미는 수직적으로 전 층이 완전히 혼합되었을 때 한반도 남서연안해역의 해수기둥이 갖는 평균의 열에너지는 황해에서부터는 공급받을 수 없으며 남방해역에서 공급받아야 된다는 것을 보여준다. 이 분포는 6월(관측점 20과 21)과 같이 전 층이 거의 완전히 혼합되었을 때의 해수 흐름을 보여준다. 그러나 9월에는 수직으로 완전히 혼합된 것은 아니므로 이 분포가 해류의 흐름과 일치하는 것은 아니다. 실제 흐름은 완전혼합된 경우(Fig. 12)와 혼합이 전혀 없는 경우(Fig. 10의 수평분포)

의 두 극한 분포의 중간 어느 길을 따랐다고 볼 수 있다. 50 m층의 분포에서는 두 분포 모두에서 제주도 서방해역과 한반도 서해연안해역이 연결되어 있으므로 해수는 여름철에 서해안을 따라 황해로 유입한다고 볼 수 있다.

그러나 평균 염분분포에서는 수온과는 달리 서해안의 해수가 황해수와 연결되어 있고 제주도 서방해역의 고염의 해수는 제주해협으로 연결된다. 염분분포가 수온과 다른 이유는 서해연안의 하천수 영향으로 보아야 할 것이다. 표면으로부터의 열유입은 모든 해역에 거의 비슷하지만 하천수유입의 영향은 해역에 따라 다르게 나타나기 때문이다. 이 해역에서는 여름철의 해수분포를 분석하는 데는 염분분포가 적당하지 않으며, 이것이 국립수산진흥원 자료의 수괴분석 결과(Rho, 1985)와 다른 분석결과가 틀리게 나타나는 이유로 보인다. 이미 언급한 바와같이 진흥원 자료에서는 여름철에 난류계 해수가 서해안을 따라 북으로 확장되는데 비해, 다른 분석에서는 전선에 의해 난류계 해수가 북으로의 확장하지 못하는 것으로 나타났다. 국립수산진흥원 자료의 수괴분석에는 하천수의 영향을 덜 받는 50 m층 이하의 수괴만을 사용하고 수온과 염분이 모두 포함되어 있는데 비해, 대부분의 다른 분석에는 염분분포만을 사용했기 때문이다. 그러나 Fig. 12의 수심평균 염분분포는 고염수가 서해연안으로 확장되고 있는 형태를 보이고 있다.

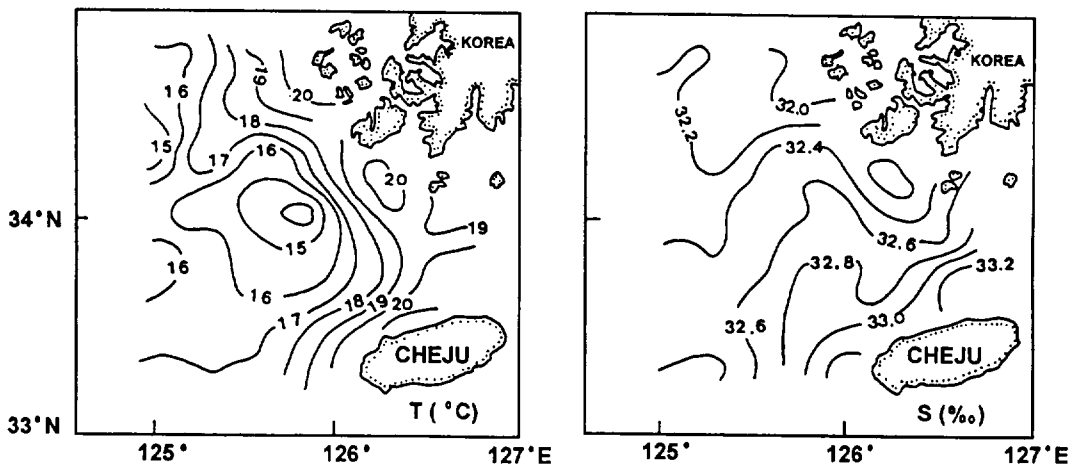


Fig. 12. Horizontal distributions of vertically mean temperature and salinity from surface to the depth of 70m(or bottom) in Sep. 6~15, 1994.

황해의 해수순환과 황해난류수

이상의 결과에서 겨울철에 난류수의 분포가 소
 흑산도 이남해역을 통해 황해로 연결되고 황해냉
 수는 서해연안을 따라 남쪽으로 확장되며, 여름철
 에는 반대로 소흑산도 이남해역에 황해저층냉수가
 남쪽으로 확장되고 난류계의 해수가 서해연안을
 따라 북쪽으로 연결되는 것을 보았다. 이러한 해수
 분포의 계절변화는 해수의 완만한 계절순환을 보
 여주는데 그 결과는 Fig. 1에서 제시된 황해의 계
 절순환을 뒷받침해 주며, 황해로 난류수계가 유입
 되는 구조를 보여주고 있다. 단 1994년 2월의 관
 측해역은 난류계 해수의 유입을 보기에는 좁기 때
 문에 1986년 1월 30일에서 2월 6일 사이에 제주대
 학교에서 관측한 자료를 참고하였다. Fig. 13은 10
 m층의 수온과 염분분포로서 1994년 2월의 관측결
 과가 왜 그런 모양을 띄게 되는지를 설명해 준다.
 겨울철에 대마난류수는 황해방면으로 많이 확장되
 어 분포하고 등온선과 등염분선을 따라 제주도를
 시계방향으로 돌아 제주해협으로 유출되는 양상을
 보인다. 황해난류수는 대마난류수의 남쪽경계를
 따라 제주도 남서해역에서 황해로 유입되며 북쪽
 경계를 따라 제주해협으로 유출됨을 알 수 있다.
 이러한 황해의 계절해수순환의 구조는 황해로

유입되는 황해난류의 존재를 확인시켜 주고 있다.
 그러나 황해난류는 과거와는 다르게 정의될 필요
 가 있다. 우선, 황해난류는 매우 완만한 흐름의 2
 차순환이며, 그 흐름은 1차순환이 확장되거나 후
 퇴하는 형식으로 나타난다. 예를 들어, 겨울철에
 황해난류수가 황해로 유입될 때 황해로 곧바로 흘
 러드는 것이 아니라 Fig. 13에 나타난 등온선이나
 등염분선이 보여 주듯이 1차흐름이 황해쪽으로 확
 장되는 형태로 유입된다. 다음에, 황해난류수는 황
 해로 유입되는 고염의 난류계 해수라는 점이다. 어
 떤 특성의 해수가 유입되어야 황해난류수라 부를
 수 있는가가 아니라 황해로 유입되는 해수로부터
 황해난류수의 특성을 정의해야 한다는 것이다.

황해난류수의 특성은 아직 정확히 정의하기에는
 이르다. 비록 이 연구에서 황해난류수의 존재 가능
 성이 밝혀졌다고는 하지만 이것은 황해난류수에
 대한 연구를 시작하는 계기를 마련한 것에 불과하
 다. 황해난류수가 항상 존재하는지 간헐적으로 나
 타나는지도 아직은 모르며, 그 흐름이 과연 해류관
 측으로 나타날 수 있는 형태의 흐름인지도 분명치
 않다. 아마도 황해난류는 특성분포의 변화에 의해
 서만 찾을 수 있는 해류인지도 모른다. 그러나 현
 재는 수괴특성들의 계절변화도 분명하게 파악하지
 못하고 있는 형편이다.

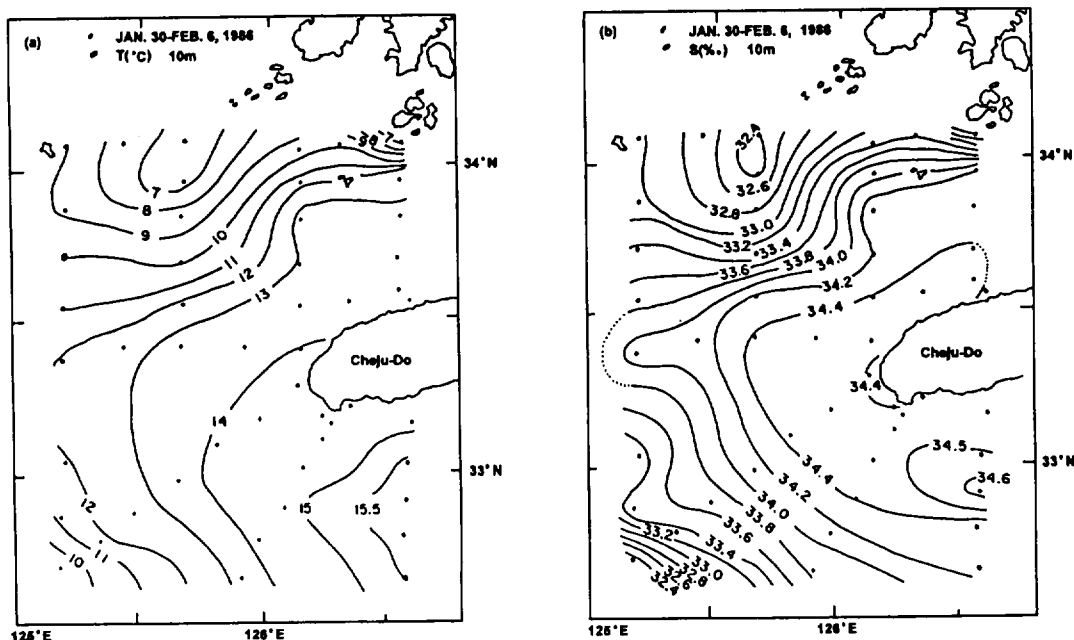


Fig. 13. Horizontal distributions of temperature and salinity on the depth of 10 m in Jan. 30 to Feb. 6, 1986.

결론 및 토의

계절순환의 구조에서 가장 중요한 해역인 제주도 북서해역에서 겨울철과 여름철에 관측을 하였으며 해수분포의 계절변화를 통해 계절적인 해수순환을 살펴보았다. 자료는 1994년 2월, 6월, 9월에 관측한 CTD 관측자료를 사용하였으며 1986년 1~2월에 관측된 자료를 참고하였다. 우선 수괴분석에서 나타난 특기할 점은 여름철에 대마난류혼합수가 뚜렷하게 분리되어 나타난 것이다. 대마난류혼합수는 저층의 특성이 대마난류수의 저층특성과 연결되어 있어 대마난류수가 다른 해역을 지나며 표층수와 혼합에 의해 생성된 수괴임을 보여준다. 이 수괴가 다른 수괴와 항상 분리되어 존재하는지는 알 수 없지만 이것은 쿠로시오계 해수의 일부가 대마난류와 분리되어 다른 경로를 통해 북상할 가능성을 보여준다.

겨울철의 해수분포는 대마난류수가 제주도 연안역을 중심으로 제주도 서방해역에서 제주해협으로 연결되어 분포하고 있어 제주도 서방해역으로 북상한 대마난류수가 모두 제주해협으로 유출됨을 보여준다. 황해냉수는 소혹산도 이남해역까지 분포하며 한반도 서해안을 따라 남하하는 구조를 보이는 반면에 황해난류수는 대마난류수와 황해냉수 사이에 분포하며 소혹산도 서쪽해역을 지나 황해중앙부를 통해 황해로 유입되는 형태를 보인다.

여름철의 해수분포에는 대마난류수가 보이지 않으며 대신에 대마난류혼합수가 나타난다. 표층에는 31% 정도로 낮은 저염수가 남서해역에 나타나 양자강연안수의 영향이 이미 6월에 시작되었음을 보여주며 이 저염수는 제주해협으로 뻗어 있다. 반면에 한반도 남서연안에는 비교적 차고 높은 염분의 해수가 분포한다. 저층에는 황해저층냉수가 소혹산도 이남해역을 통해 남하하며 황해난류수를 동쪽으로 압박하는 형태를 보인다. 황해난류수는 50 m 층의 수온분포로 보면 서해연안으로 연결되는 형태를 보이지만 염분분포로 보면 서해안과 차단되어 있다.

한반도 남서해안은 강한 조석으로 인한 수직혼합이 발생하는 해역으로 해수기둥의 평균수온으로 보면 한반도 남서연안의 해수는 황해난류수와 연결되어야 한다. 6월의 평균염분에서는 이러한 경향이 나타나는데 반해, 9월의 평균염분에서는 한반도 남서연안의 해수가 제주도 서방해역의 고염

수와 차단된 것으로 나타난다. 그 이유는 9월에 한반도 남서해역이 하천수의 영향을 많이 받아 저염화되었기 때문이다. 하천수의 영향을 받지 않는 수온이나 덜 받는 6월의 염분분포를 보면 황해난류수가 여름철에 한반도 남서해역으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 1992년 9~10월에 황해에서 실시된 승(1993)의 관측결과는 고염수가 한국 서해안 저층을 따라 분포하고 있음을 보여 황해난류수의 한반도 남서해역 유입의 가능성을 뒷받침해 주고 있다. 또한, 황해남부해역에서 쿠로시오 지표층인 플랑크톤의 출현보고(심 등, 1988)와 같이 생물 및 화학적인 추적자 분포의 연구도 황해난류수 유입여부를 밝히는 간접적인 방법으로 유용하리라 본다.

이러한 결과는 Fig. 1에 제시된 해수순환의 계절변화를 뒷받침해 주는 것이다. 1차순환은 대마난류의 순환으로 년중 지속되는데 비해, 2차순환은 계절풍에 의해 발생하는 계절순환으로 1차순환의 변형의 형태로 나타난다. 황해해수순환에서 중요한 역할을 하며 황해에 열과 염을 공급하는 황해난류수는 이번 관측결과에서 존재 가능성을 보였다. 그러나 관측해역의 범위가 황해난류수의 황해유입을 보다 확실히 보여줄 수 있을 만큼 넓지 못하기 때문에 앞으로 확대된 해역의 조사가 필요하다. 특히 겨울철에 소혹산도 남쪽해역을 통해, 여름철에 서해안을 따라 황해난류수가 황해로 유입되는 것을 밝히기 위해서는 관측해역이 보다 서방해역과 북방해역으로 확대되어야 할 것이다.

요 약

제주도 서방해역에서 1994년 2월 17~18일, 6월 20~22일, 9월 6~15일에 관측한 CTD 자료와 제주대학교에서 관측한 기존의 자료를 분석하여 해수분포와 해수순환의 계절변화를 알아보았다.

겨울철에는 대마난류수가 제주도 연안역을 중심으로 제주도 서방해역에서 제주해협으로 연결되어 분포하고 있으며 대마난류수가 제주도 서방해역을 지나 모두 제주해협으로 유출되고 있다. 황해냉수는 소혹산도 이남해역까지 분포하며 한반도 서해안을 따라 남하하는 구조를 보인다. 황해난류수는 대마난류수와 황해냉수 사이에 분포하며 소혹산도 서쪽해역을 지나 황해중앙부를 통해 황해로 유입되는 형태를 보인다.

여름철에는 표층에 대마난류수는 보이지 않으며, 31 % 정도의 저염수가 나타나 양자강연안수의 영향이 6월에 이미 시작되었음을 보여 준다. 이러한 저염수는 남서해역에서 제주해협까지 나타나 있다. 한편, 대흑산도 부근의 한반도 남서 연안에는 비교적 차고 높은 염분의 해수가 분포한다. 저층의 황해저층냉수는 황해중앙부를 통해 남하하며 황해난류수를 제주 근해로 압박하는 분포를 보인다. 자료분석 결과는 대흑산도 부근 해역의 해수기둥이 갖는 높은 염분은 이남의 고염수의 공급을 받아야만이 가능하며, 하천수 유입의 영향을 받지 않는 수심의 수온분포를 보면 황해난류수가 제주도 해역에서 대흑산도 해역으로 유입되고 있는 것이 보인다.

황해난류수가 서해안을 따라 황해로 유입되는 형태는 바람이 강할 때만 간헐적으로 나타나는 현상일 수도 있으나 순환구조의 가능성을 보여주었다는 점에서 매우 귀중한 결과이다. 이러한 결과는 Pang *et al.*(1992)에 의해 제시된 겨울철에 연안을 따라 남하하고 황해의 깊은 골을 따라서는 북상하며, 여름철에 연안을 따라 북상하고 황해의 깊은 골을 따라서는 남하하는 계절순환의 구조를 뒷받침해 준다.

사 사

이 논문은 1993~1994년 과학기술처의 연구과제(과제번호 BSPN 00246-711-1)로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Asaoka, O. and S. Moriyasu, 1966. On the Circulation in the East China Sea and the Yellow Sea in Winter (Preliminary Report). *Oceanogr. Mag.*, 18(1~2), 73~81.
- Beardsley R. C. and R. Limeburner, 1983. Structure of the Changjiang River Plume in the East China Sea during June 1980. Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea. Acta, editor, *Oceanologica Sinica*. China Ocean Press, Beijing, 243~260.
- Byun, S. K. and K. I. Chang, 1988. Tsushima Current Water at Entrance of the Korea Strait in Autumn. *Prog. Oceanogr.*, 21, 295~296.
- Csanady, G. T., 1982. Circulation in the Coastal Ocean. D. Reidal Pub. Co., 279.
- Hsueh, Y. and I. C. Pang, 1989. Coastally Trapped Long Waves in the Yellow Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 19(5), 612~625.
- Kim I. O., 1986. A Study on Coastal Waters of the China Continent appeared in the neighbouring Seas of Cheju Island. MS thesis, Cheju National Univ., 46.
- Kim, K., H. K. Rho and S. H. Lee, 1991. Water Masses and Circulation around Cheju-Do in Summer. *J. Oceanog. Soc. Korea*, 26(3), 262~277.
- Lie, H. J., 1984. A Note on Water Masses and General Circulation in the Yellow Sea (Hwanghae). *J. Oceanog. Soc., Korea*, 19, 187~194.
- , 1985. Wintertime Temperature and Salinity Characteristics in the south-western Hwanghae (Yellow Sea). *J. Oceanog. Soc. Japan*, 41, 281~291.
- 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. Nov., 199~366.
- Pang, I. C., 1987. Theory of Coastally Trapped waves and its application to the Yellow Sea. Ph. D Thesis, Florida state Univ., 128 pp.
- Pang, I. C., H. K. Rho and T.H. Kim, 1992. Seasonal Variations of Water Mass Distributions and their Cause in the Yellow Sea, the East China Sea and the adjacent Seas of Cheju Island, *Bull. Korean fish. Soc.*, 25(2), 151~163.
- Park, Y. H., 1985. Some Important Summer Oceanographic Phenomena in the East China Sea. *J. Oceanog. Soc. Korea*, 20, 12~21.
- , 1986. A Simple Theoretical Model for the Up-wind flow in the southern Yellow Sea. *J. Oceanog. Soc. Korea*, 21, 203~210.
- Rho, 1985. Studies on marine environments of

- fishing ground in the waters around Cheju Island, Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo, pp225.
- Uda M., 1934. The Results of Simultaneous Oceanographical Investigations in the Japan Sea and its adjacent Waters in May and June, 1932. J. Imp. Fisher. Exp. St., 5, 57~190.
- Youn, Yong-Hoon, Y. H. Park, and J. H. Bong, 1991. Enlightenment of the Characteristics of the Yellow Sea Bottom Cold Water and its southward Extension. J. Korean Earth Science Society, Vol. 12(1), 25~37.
- Yu, H., D. Zheng, and J. Jiang, 1983. Basic Hydrographic Characteristics of the Studied Area. Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea. Acta, editor, Oceanologica. Sinica. China Ocean Press, Beijing, 270~279.
- Zhao, B. and G. Fang, 1991. Estimation of Water Volume Transports through the main Straits of the East China Sea, Acta Oceanologica Sinica, 10, 1~13.
- Zhao, J., R. Qiao, R. Dong, J. Zhang, and S. Yu, 1983. An Analysis of Current Conditions in the Investigation Area of the East China Sea : Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea. Acta, editor, Oceanologica. Sinica. China Ocean Press, Beijing, 288~301.
- 김복기, 강용균, 1993. 서해남부 전선역의 1990년 해황. 황해연구, 5, 21~32.
- 강철중, 1979. 한국서해 해황의 계절적 변동에 대하여. 수산진흥원연구보고지, 8, 9~29.
- 승영호, 1993. 황해의 수온, 염분, 밀도의 특성. 황해의 해양자원 개발연구 보고서, 과학기술처, 65~100.
- 심문보, 최중기, 김동엽, 1988. 황해 중동부역의 동물플랑크톤 분포에 대한 연구. 황해연구, 1, 1~10.