

남·서해의 계절 순환과 여름철 난류수의 서해 유입

현경훈 · 방익찬 · 노홍길*

제주대학교 해양학과

*제주대학교 어업학과

The seasonal circulation in the South and West Seas and the inflow of warm waters into the West Sea in summer

Kyung-Hoon Hyun · Ig-Chan Pang and Hong-Kil Rho*

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

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

In order to study on the seasonal circulation in the South and West Seas of Korean Peninsula and the inflow of warm waters into the West Sea(eastern Yellow Sea) in summer, water mass analysis is used with temperature and salinity data observed by National Fisheries Research & Development Agency during 1970~1990. In the West Sea, warm waters are majorly mixed by the mixing rate of 40~60% in summer, while cold waters are dominant in winter. In the central region of the Yellow Sea, warm waters are distributed linked with the northwestern sea of Cheju Islands in winter but cold waters are distributed in the lower layer in summer. The reverse of water mass distributions in winter and summer could be explained only by the seasonal circulations. In winter, warm waters are intruded to the central region and cold waters flow southward along the west coast of Korea. In summer, warm waters flow northward along the west coast of Korea and cold waters flow southward in the central region. Therefore, Yellow Sea Warm Waters can be defined as the northward flow of warm waters toward the central region of the Yellow Sea in winter and along the west coast of Korea in summer.

Key words : mixing rate, water mass analysis, seasonal circulation, Yellow Sea Warm Waters

서 론

여름철에 난류수가 황해로 유입되는지의 문제는 황해의 해수순환을 파악하는데 매우 중요하다. 일반적으로, 한반도 남서해역에 형성되는 염분전선으로 인해 여름철에는 고염의 난류수가 황해로 유입되지 않는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1991; Park, 1986b; Kondo, 1985; Lie, 1984, 1985). 그러나, 여름철 난류수의 황해 유입에 관한 지금까지의 연구 방법에는 다음과 같은 두 가지의 문제점이 있는 것으로 보인다.

첫째는 난류수의 유입 경로로 추정되는 한반도

남서해역의 해양학적 환경에 대한 충분한 고려가 부족했다는 것이다. 이 해역은 여름철에 많은 양의 담수 유입과 강한 조석혼합으로 수온과 염분이 크게 영향을 받기 때문에, 어느 한 층의 현장수온이나 현장염분 분포로는 해역 전체의 해수분포를 설명하기가 어렵다. Fig. 1은 1994년 6월 하순에 제주대학교에서 관측한 자료인데, 남서해역에서 발생하는 강한 조석혼합(Seung et al., 1990)에 의해 상층은 저온화되고 하층은 고온화되어 상층과 하층의 수온분포가 전혀 다르게 나타난다. 염분도 조석혼합에 의해 상층은 고염화되고 하층은 저염화되어 상층과 하층의 분포가 달라지게 된다. 같은 하층에서

수온분포와 염분분포를 비교해도, 수온분포로는 제주도 주변의 해수와 서해안의 해수가 연결되는 것으로 나타나는 반면, 염분분포로는 두 해역의 해수가 차단되는 것으로 나타난다. 이 해역이 여름에 많은 양의 담수 유입으로 염분은 영향을 크게 받는데 비해, 수온은 모든 해역이 비슷한 정도로 기상 영향을 받기 때문에 수온이 염분보다 믿을 수 있는 자료로 볼 수 있지만, 수온분포가 이 해역의 해수 분포를 정확히 나타낸다고 말하기도 어렵다. 이와 같이 수온과 염분이 서로 다른 양상으로 분포하는 것을 어떻게 해결하느냐의 문제는 이 해역의 해수 순환을 파악하는데 중요한 과제이다.

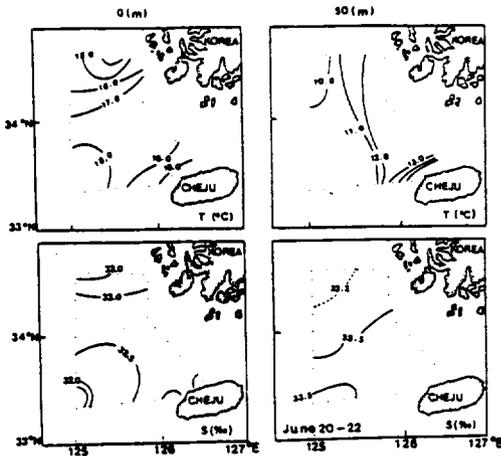


Fig. 1. Horizontal distribution of temperature and salinity in the depth of 0m and 50m in the northwestern sea of Cheju Islands in June 20~22, 1994 (after Pang et al., 1996).

두번째는 난류수의 해수특성에 대한 정의를 어떻게 내리는가 하는 문제이다. 지금까지 대부분의 연구에서는 제주도 주변해역의 저층에 분포하는 고염의 해수를 여름철 황해난류수(Yellow Sea Warm Waters)라고 미리 정의하고 이 황해난류수가 황해로 유입되는지 혹은 유입되지 않는지를 판단하므로써 여름철 난류수의 황해 유입을 결정지어 왔다. Fig. 2는 Park(1986b)의 논문 자료인데, 이 논문에서는 34‰ 이상의 고염수를 여름철 황해난류수라고 정의하고 황해난류수는 한반도 남서해역에서 형성되는 염분전선에 의해 황해로 유입되지 않고 제주도 서측을 우회하여 제주해협 동쪽으로 빠져나간다고 하였다. 그런데 이 그림은 보다

저염화된 고염수가 서해안으로 연결되고 있음을 동시에 보여주고 있다. 따라서 매우 고염인 해수가 황해로 유입되지 않는다고 해서 고염의 난류수가 황해로 유입되지 않는다고 말하기는 어렵다.

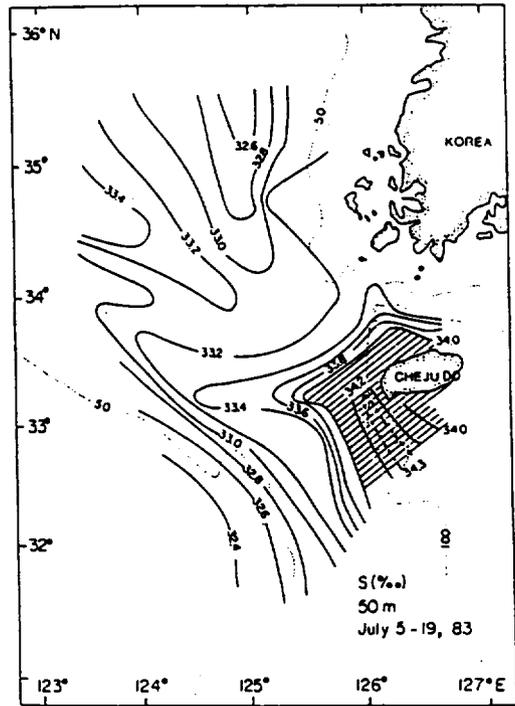


Fig. 2. Horizontal distribution of salinity in the southern Yellow Sea and the northwestern East China Sea in July 5~19, 1983(after Park, 1986b).

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 여름철 난류수에 대한 새로운 접근 방법이 필요하다. 황해의 해수 흐름은 매우 약하기 때문에 이 문제를 해류 자료로 해결하는 것도 쉽지 않다. 이 연구에서는 이러한 문제를 장기간 자료에 대한 수괴 분석(water mass analysis)으로 연구하였다. 장기간 자료를 사용한 이유는 경향의 지속성을 보기 위함이다. 수괴 분석은 T-S diagram을 이용한 분석과 혼합비율을 통한 분석 방법을 사용하였다. 혼합비율을 통한 수괴 분석은 수온과 염분이 동시에 하나의 해수특성으로 반영되기 때문에 독자적인 수온분포나 염분분포보다는 신뢰성이 높은 것으로 보인다. 지금까지 널리 사용되어 오던 어느 한 층의 수온이나 염분분포에서 명확하지 않던 부분을 수괴 분

석으로 명확히 분석하고, 그 해수분포의 계절 변화로부터 해수순환을 유추하여, 그로부터 여름철 난류수의 황해 유입을 규명해 보았다.

자료 및 분석 방법

사용된 자료는 국립수산진흥원(NFRDA)이 1970~1990년까지 21년간 관측한 남해와 서해의 수온 염분자료이다. Fig. 3은 관측점과 연구해역을 나타낸 것이다. 중국과 한반도로 둘러싸인 전체 해역을 황해(Yellow Sea)라고 하였고, 편의상 황해의 우리나라 연안을 서해(West Sea), 제주도 주변해역을 포함한 우리나라 남쪽해역을 남해(South Sea)로 구분하였다. 해역별 T-S diagram(Fig. 5)을 나타낼 때 사용하기 위하여, 연구 해역을 위도 1/2°, 경도 1/4°간격의 사각형으로 구분하였다. 해역별 T-S diagram은 각 사각형안에 있는 관측점들의 자료가 그 사각형(x축은 염분, y축은 수온)에 표시되도록하여 해수특성의 해역별 변화를 보기 위한 것이다. 그림에서 313정선과 314정선의 사각형이 중복되어 313정선의 관측점을 바로 위에 있는 사각형에 적용시켜 모든 T-S diagram에 자료가 표시되도록 하였다.

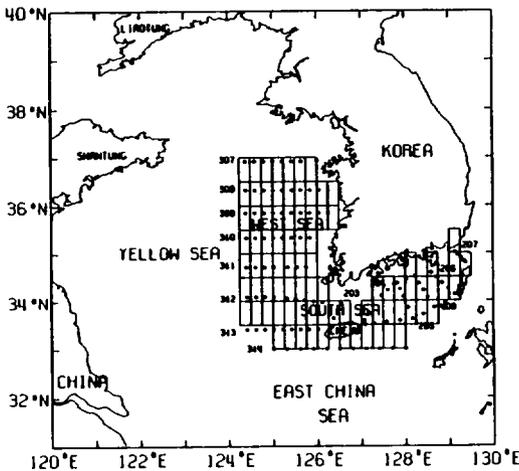


Fig. 3. Hydrographic stations of National Fisheries Research & Development Agency(NFRDA). The numbers are the station lines. The study area is divided by squares to be used for T-S diagrams

수괴 분석은 우선 T-S diagram과 빈도수 T-S diagram으로 전체 자료를 나타내어 남·서해에서 격월별로 나타나는 해수특성을 파악하였고, 해역별 T-S diagram으로 해수분포를 분석하였다. 혼합비율을 통한 수괴 분석은 여름철 서해에 존재하는 혼합수가 냉수와 연안수의 혼합인지, 아니면 난류수와 연안수의 혼합인지를 파악하는데 초점을 맞추었으며, 4개의 근원수괴에 대한 혼합비율 계산하는 방법(Mamayev, 1975)을 사용하였다. 여름철에 난류수가 서해로 북상함을 확인하기 위하여 T-S-time diagram과 통계적인 염분분석도 아울러 사용하였다. 해수분포의 계절 변화로부터 계절 순환을 유추하려는 이 논문의 목적상, 해수분포가 뚜렷하게 구분되는 겨울철과 여름철 두 계절로 나누었으며, 겨울철은 12, 2, 4월, 여름철은 6, 8, 10월로 정하였다.

해수특성과 해수분포의 계절 변화

— 해수특성의 계절 변화

남·서해에 나타나는 해수특성의 계절 변화를 알아보기 위하여 21년간 전체 자료를 T-S diagram에 격월별로 나타내었다(Fig. 4). 이 그림에서 우변과 하변의 막대그래프는 수온 0.5°C, 염분 0.1‰ 간격 내에 표시되는 자료의 빈도수(頻度數)를 전체 자료수에 대한 백분율로 나타낸 것이다. 이 막대그래프는 수괴들의 출현빈도수를 정확히 나타내어 수괴를 구분하기 쉽게 하기 위한 것이다. T-S diagram상의 비스듬한 점선은 밀도(σ_t)를 나타낸다.

Fig. 4(A)는 2월, 4월, 12월의 T-S diagram을 나타낸 것인데, 이 시기에 출현하는 해수는 고온고염의 난류수와 저온저염의 냉수로 뚜렷이 구분된다. 수온이 가장 낮은 2월에 수괴의 경계가 가장 뚜렷하고, 4월, 12월에는 경계 범위가 약간 넓어지거나 두 수괴로 분리되는 특징은 잘 나타난다. 두 수괴로 구분되는 이 시기의 수괴들을 '겨울철 수괴'로 정의하였다. Table 1에는 겨울철과 여름철의 해수특성이 정리되어 있다. 냉수와 난류수는 수온 9.0~10.0°C(2월, 4월), 13.0~14.0°C(12월), 염분 33.2~33.7‰를 경계로 구분된다. 12월의 수온은 2월, 4월보다 전체적으로 3~4°C 높다.

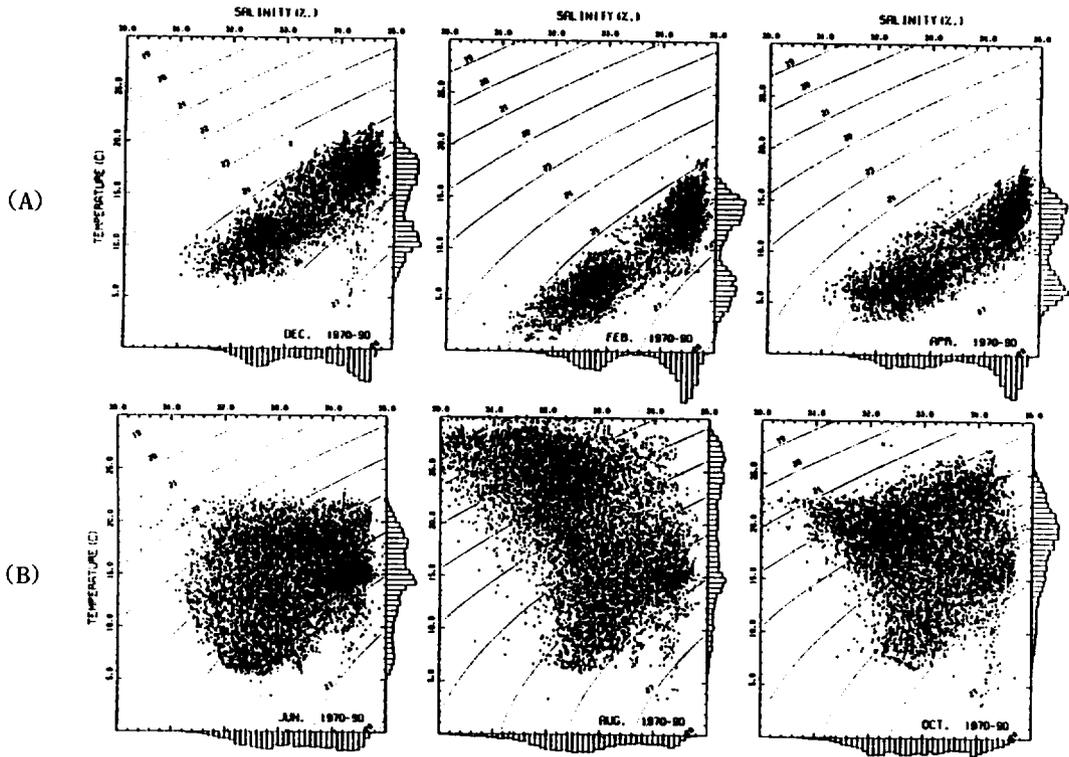


Fig. 4. T-S diagrams of the South and West Seas in (A) winter and (B) summer during 1970~1990. The numbers on the curve show σ_t . Stacks on the right and bottom sides show the rates of the number of data plotted within the strip of 0.1‰ or 0.5°C to the total number of data.

Fig. 4(B)는 6월, 8월, 10월의 해수의 T-S diagram을 나타낸 것인데, 이 시기에 출현하는 수괴들은 상층(upper layer)과 하층(lower layer)의 수온과 염분 차이가 생기고 수온 염분 범위도 넓어져서 수괴를 구분하기가 어렵다. 겨울철에 나타났던 냉수와 난류수는 각각 저온저염수, 저온고염수로 하단에 나타나고, 상단에는 고온저염수, 고온고염수

가 나타나며, 그들의 혼합수들이 수괴구분을 어렵게 만든다. 8월에 상하 층의 수온 차와 염분 차이가 가장 크며, 혼합수가 급증하고 6월과 10월에 비해 25°C이상의 고온수와 31‰ 이하의 저염수도 매우 증가한다. 이것은 연중 8월에 상층 온도가 가장 높고 연안수의 영향도 가장 크다는 것을 의미한다.

Table 1. The ranges of temperature and salinity in the South and West Seas in winter and summer during 1970~1990.

| property \ season | winter | | | | summer | | |
|-------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | water mass | Dec. | Feb. | Apr. | Jun. | Aug. | Oct. |
| T(°C) | cold water | 6~13 | 1~9 | 3~9 | 5.0~23.0 | 6.0~31.0 | 6.0~27.0 |
| | warm water | 14~22 | 10~19 | 10~18 | | | |
| S(‰) | cold water | 31.0~33.2 | 31.2~33.2 | 31.2~33.2 | 31.2~34.8 | 29.0~34.8 | 30.8~34.8 |
| | warm water | 33.7~34.8 | 33.7~35.0 | 33.7~35.0 | | | |

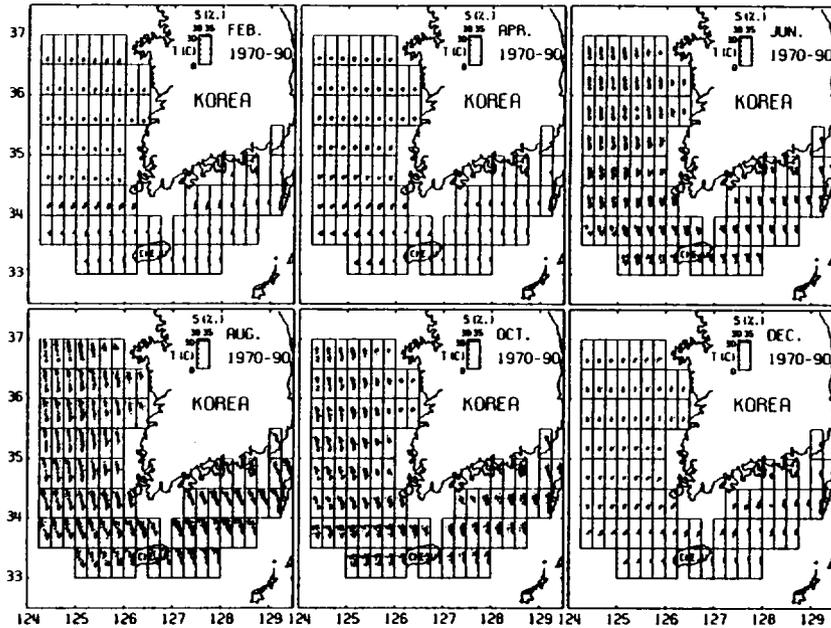


Fig. 5. Bimonthly spatial T-S diagrams of the South and West Seas during 1970~1990. X and y axes of each T-S diagrams represent salinity (30~35‰) and temperature (0~30°C), respectively.

— 해수분포의 계절 변화

해수분포의 계절 변화를 보기 위하여 연구 해역에 위도 1/2°, 경도 1/4° 간격의 해역별 T-S diagram을 나타내었다. Fig. 5의 해역별 T-S diagram에서 x축은 염분(30.0~35.0‰), y축은 수온(0~30°C)을 나타낸다.

겨울철인 2, 4, 12월에 서해에는 저온저염의 냉수, 남해에는 고온고염의 난류수가 분포한다. 2월 그림에서 서해의 냉수는 서해안으로 갈수록, 위도가 높아질수록 수온이 낮아지는데, 이것은 냉수의 성격이 서해북부로 갈수록 강하다는 것을 나타낸다. 남해에는 고온고염의 난류수가 분포하는데 124°E까지도 난류수가 나타나는 것으로 보아 보다 서쪽인 황해중앙부로 난류수가 연결되어 분포하고 있음을 보여준다. 34°N 근처에서 해수특성이 남북으로 급격히 바뀌는데, 이것은 이 부근에서 두 수괴가 만나 동서로 강한 전선을 형성한다는 것을 나타낸다.

여름철인 8월에는 황해중앙부를 따라서 10°C이하의 냉수가 하층에 분포하고, 난류수의 분포는 제주도 주변과 남해동부에 국한된다.(윤, 1986;

Youn et al., 1991 참조) 따라서 남해서부의 하층에는 제주도 주변의 난류수와 황해중앙부의 냉수가 대치하고 있다. 여름철에 황해중앙부를 따라 냉수가 분포하여 난류수를 제주도 주변해역으로 국한시키는 현상은 겨울철에 황해중앙부로 난류수가 북상하여 분포하는 것과는 정반대이다. 또한 서해에는 하층 수온이 높아져 겨울철에 강하던 냉수의 세력은 사라지고 황해중앙으로 갈수록 하층의 수온이 낮아져 겨울철과 역시 반대의 분포를 보이고 있다.

그러나 여름철 서해에서 하층의 염분을 보면 겨울철과 별로 달라지지 않고 있다. 이것은 두가지로 해석할 수 있는데, 첫째 겨울철 저염의 냉수가 여름철에 태양열로 인해 수온이 높아졌다는 것이며, 둘째 냉수의 세력이 후퇴하고 고염의 난류수가 북상하였으나 강수의 유입으로 염분이 높아지지 못했다는 것이다. 그러므로 서해의 혼합수가 연안수와 황해중앙의 해수와와의 혼합인지 혹은 남쪽에서 북상하는 난류수와 연안수와의 혼합인지를 분석하여 여름철 난류수의 서해 유입 여부를 밝히는 것은 매우 중요하다. 이 논문에서는 혼합비율을 통한 수괴 분석으로 이 문제를 해결해 보았다.

혼합비율을 통한 수괴 분석

－ 분석 방법

혼합비율을 통한 수괴 분석을 하기 위해서는 우선 전 계절에 걸쳐 해수특성이 뚜렷한 근원수괴를 파악하고 근원수괴의 대표값을 설정하여야 한다. 근원수괴를 파악하기 위하여, Fig. 6과 같은 빈도수 T-S diagram으로 전체자료를 나타내어 보았다. 그림에 표시된 수치들은 단위 사각형(unit square : 수온 1°C, 염분 0.2‰ 간격의 사각형) 안에 포함되는 자료의 빈도수를 나타내고, 곡선은 이 수치들에 대한 등치선(等值線)을 그린 것이다.

Fig. 6에서 보는 것처럼, 겨울철인 2월에 냉수는 6°C, 32.7‰, 난류수는 14°C, 34.5‰를 중심으로 모여 있고, 이 두 수괴는 여름철의 하층에도 나타난다. 여름철인 8월에는 이외에도 고온저염수와 고온고염수가 나타나며, 네 수괴의 중간 특성을 갖는 혼합수괴도 나타난다. 즉 수괴는 겨울철에 2개가 나타나고 여름철이 되면서 4개의 수괴가 나타났다가, 겨울철이 되면서 다시 2개로 되는 계절 변화를 한다. 따라서 전 계절로는 남·서해에는 4개의 근원수괴(original water mass)가 출현한다. 이 4개의 근원수괴를 고온저염수는 연안수(Coastal Waters

: CW), 저온저염수는 황해냉수(Yellow Sea Cold Waters : YSCW), 고온고염수는 대마난류표층수(Tsushima Surface Waters : TSW), 저온고염수는 대마난류심층수(Tsushima Deep Waters : TDW)로 정의하였다.

근원수괴의 대표값을 설정하는 방법은 격월별로 다른 값을 정하는 방법과 값을 고정시키는 방법이 있다. 그런데 격월별로 다른 값을 적용하여 분석한 결과, 기준이 서로 달라 계절별로 비교하기에 적당하지 않았다. 따라서 이 논문에서는 4수괴의 대표값을 고정시키는 방법을 채택하였는데, 겨울철에 출현하는 두 수괴는 여름철 저층에서 출현하는 두 수괴와 특성이 비슷하기 때문에 값을 고정해도 무리가 없는 것으로 본다. 대표값은 21년 평균 자료를 나타낸 T-S diagram 상에서 최대한 많은 점들을 둘러싸는 사각형을 그리고 이 사각형의 네 꼭지점으로 설정하였다. 즉 연안수는 고온저염수, 황해냉수는 저온저염수, 대마난류심층수는 저온고염수, 대마난류표층수는 고온고염수로 표시되므로, 수온 염분의 최대값과 최소값(최저염 : 연안수, 최고염 : 대마난류심층수, 최고온 : 대마난류표층수, 최저온 : 황해냉수)으로 각 근원 수괴의 대표값들이 설정되었다(Fig. 7(A)). Table 2는 4개의 근원 수괴에 대한 대표값을 나타낸 것이다.

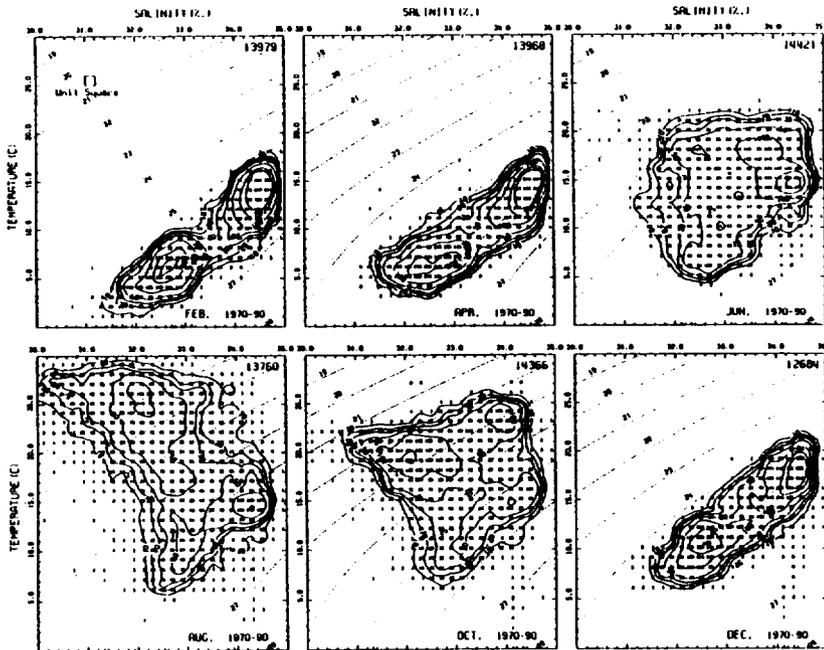


Fig. 6. Frequency T-S diagrams of the South and West Seas during 1970~1990, which show the number of data plotted in the square of 1°C and 0.2‰ as depicted in the upper left.

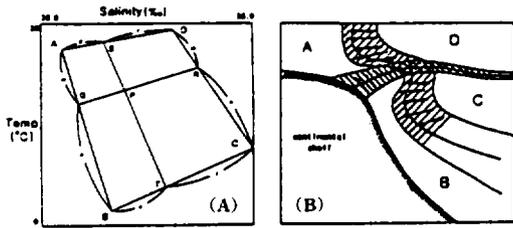


Fig. 7. (A) The diagram representing the mixing of four water masses which appear in the South and West Seas. A, B, C, D represent Coastal Waters (CW), Yellow Sea Cold Waters (YSCW), Tsushima Deep Waters (TDW), and Tsushima Surface Waters (TSW), respectively. (B) Stylized diagram of the distribution and interaction of water masses in the coastal sea. The shaded regions correspond to the zones of horizontal and vertical mixing waters. (Miller, 1950).

4개의 수괴에 대한 혼합비율을 계산하기 위해서는 질량을 제외한 3개의 해수특성 변수가 필요하여 수온, 염분, 용존산소를 가지고 수괴 분석을 해보았으나, 용존산소는 비보존 특성이므로 이 해역이 천해역이므로 결과를 신뢰하기가 어려웠다. 따라서 수온과 염분만을 가지고 연안 해역에서 수괴 분석하였던 Miller(1950)의 방법이 사용되었으며, 이 방법은 대만 동부 해역에서 Chen 등(1993)에 의해 적용된 적이 있다. 이 방법은 4개의 수괴가 각기 독립적으로 혼합하는 것이 아니라 수평과 수직방향으로 주로 혼합이 이루어진다는 가정에 의한 것이다(Fig. 7(B)).

Table 2. Representative temperatures and salinities of four water types for water mass analysis.

| water type | T(°C) | S(‰) | original water mass |
|------------|-------|------|-------------------------|
| A(CW) | 27.0 | 30.3 | Coastal Waters |
| B(YSCW) | 2.5 | 32.0 | Yellow Sea Cold Waters |
| C(TDW) | 12.0 | 35.0 | Tsushima Deep Waters |
| D(TSW) | 29.0 | 33.4 | Tsushima Surface Waters |

혼합비율은 T-S diagram상의 임의의 자료에서 각 수괴에 대한 거리를 계산함으로써 이루어진다. Fig. 7(A)는 4개의 근원수괴에 대한 각각의 수온

염분값을 나타낸 것으로 A는 연안수(CW), B는 황해냉수(YSCW), C는 대만난류심층수(TDW), D는 대만난류표층수(TSW)를 나타낸다.

Fig. 7(A)에서 임의의 해수(P(P_x, P_y))가 A(A_x, A_y), B(B_x, B_y), C(C_x, C_y), D(D_x, D_y)의 혼합으로 이루어진다고 가정하자. 네 근원수괴 A, B, C, D가 혼합해서 해수 P를 구성하는 혼합비율을 각각 f_a, f_b, f_c, f_d 라고 하면, $f_a + f_b + f_c + f_d = 100(\%)$ 이 된다. 여기서 선분AB를 $m : n$ 으로 내분하는 좌표를 Q(Q_x, Q_y), DC를 $m : n$ 으로 내분하는 좌표를 R(R_x, R_y)이라고 하고, 선분AD를 $k : l$ 로 내분하는 좌표를 S(S_x, S_y), 선분BC를 $k : l$ 로 내분하는 좌표를 T(T_x, T_y)라고 하자. 그러면 P는 선분ST를 $m : n$, 선분QR를 $k : l$ 로 내분하는 점이 된다. 그러므로 P에 대한 각 근원수괴의 비율은 $f_a = l \times n$, $f_b = l \times m$, $f_c = k \times m$, $f_d = k \times n$ 이 되고(단, $k + l = 1, m + n = 1$ 일 때), 각 값에 100을 곱해 주면 백분율로 환산된다. 따라서 값을 알고 있는 임의의 해수 좌표와 네 근원수괴의 좌표를 이용하여 내분하는 거리의 비율을 구하면 임의의 해수의 혼합비율을 알 수 있게 된다. 내분하는 거리의 비율을 구하는 방법은 현(1996)에 자세히 정리되어 있다.

— 분석 결과

Fig. 8(A)는 겨울철 해수분포를 나타내는 2월의 수괴 분석 결과를 나타낸다. 단위는 %로 나타내었고, 수심별(0m, 30m, 50m) 구분하였다. 겨울철에는 황해냉수(YSCW)와 대만난류심층수(TDW)만이 주로 나타난다. 서해에서는 황해냉수, 남해에서는 대만난류심층수가 50% 이상의 높은 수치를 나타내며 상층과 하층의 분포 형태가 같다. 냉수는 위도가 높아질수록 수치가 커지고, 난류수는 제주도 남동쪽으로 갈수록 수치가 커진다. 서해에서 분포곡선의 방향이 북서-남동 방향으로 비스듬한 것은 황해중양부보다 서해안에서 냉수가 강하고, 황해중양부로 난류수가 연결되고 있음을 암시한다. 따라서 황해냉수는 서해 북부에서 서해 남부로 연결되어 분포하고, 난류수는 제주도 주변해역에서 황해중양부로 연결되어 분포하고 있음을 알 수 있고, 이것은 해수분포에 대한 분석에서 나타났던 결과와 일치한다.

Fig. 8(B)는 여름철인 8월의 분포로서 상층과 하층의 분포 형태가 달라진다. 상층에서는 연안

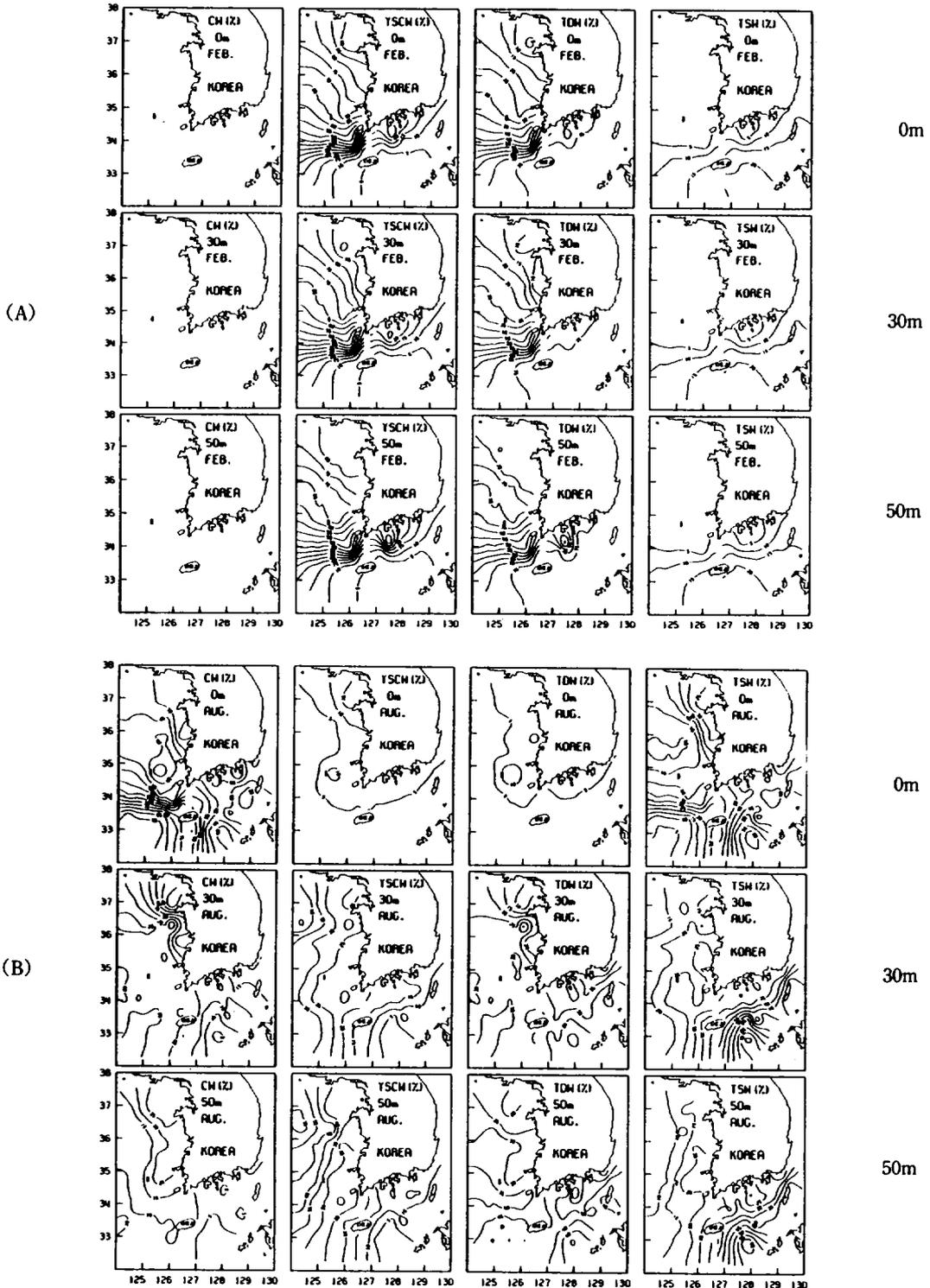


Fig. 8. Mixing rates (%) of four water types in (A) Feb., (B) Aug.

수(CW)와 대마난류표층수(TSW), 하층에서는 황해냉수(YSCW)와 대마난류심층수(TDW)가 주로 분포한다. 상층에서는 연안수(CW)가 전 해역에서 50% 이상 나타나고 특히 남해서부에서는 70% 이상의 높은 수치를 나타낸다. 대마난류표층수는 남해에서 35~50%의 분포를 보인다. 하층에서 황해냉수는 황해중앙부를 따라 40%이상의 수치를 보이고, 난류수(TSW+TDW)는 서해안과 남해 전역에서 40% 이상의 분포를 보인다. 그리고 고위도로 갈수록 황해냉수의 수치가 높게 나타나고, 제주도 동부해역에서 난류수의 수치가 높게 나타난다. 이는 여름철에 냉수는 황해중앙부를 따라 북쪽에서 남쪽으로 길게 분포하고, 난류수는 남해의 난류수역에서 서해안으로 연결되어 분포하고 있음을 나타낸다.

이상과 같이, 겨울철과는 달리 여름철 하층에서 황해냉수(YSCW)는 황해중앙부를 따라 남북으로 분포하고, 난류수(TSW+TDW)는 서해안과 남해에 분포한다. 서해안의 하층에서 난류수의 비율은 40~60%로 나타나, 난류수의 성격이 강한 혼합수가 이 해역에 분포하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 분석 결과는 난류수가 남해에서 서해안으로 연결되고 있음을 보여준다.

남·서해의 계절 순환과 황해난류

— 남·서해의 계절 해수순환

수괴 분석 결과, 서해에서 겨울철과 여름철의 해수분포는 하층에서 정반대로 나타남을 알 수 있었다. 이러한 해수분포의 변화를 격월별로 연속해서 나타내 보았다. Fig. 9(A)는 혼합비율을 통한 수괴 분석에서 계산한 황해냉수(YSCW)의 비율을 수심별로(0m, 30m, 50m) 2월에서 12월까지 연속해서 나타낸 수평 분포도이다. 하층인 50m의 분포를 보면, 겨울철인 2월, 4월에 서해안에서 70% 이상의 수치를 보이며 서해북부에서 서해남부로 영향을 주다가 여름철인 6월, 8월, 10월로 갈수록 그 세력이 서해안에서 떨어져 황해중앙부를 따라 길게 분포하고, 12월로 접어들면서 다시 서해안에서 냉수의 세력이 강해짐을 알 수 있다. Fig. 9(B)는 난류수(TSW+TDW)의 비율을 격월별로 연속해서 나타낸 것이다. 하층인 50m의 분포를 보면, 겨울철인 2월과 4월에는 황해중앙부로 50%의 난류수

가 연결되어 분포하다가, 여름철인 6월, 8월, 10월에 접어들면서 서해안으로 난류수가 연결되어 분포하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 하층에서 50%의 냉수와 난류수의 등치선을 각각의 평면에 나타낸 것이다. Fig. 10(A)에서 난류수는 겨울철인 12월과 2월에 34°N 근처에 위치하고, 황해중앙부로 연결되고 있음을 보여준다. 여름철인 6월, 8월, 10월에는 35°N 근처까지 난류수가 북상하여 분포하면서 서해안으로 치우치고 있음을 알 수 있다. 여름철에 난류수의 북상은 위도 상으로는 작은 거리이지만, 많은 양의 하천수가 서해로 유입됨을 감안한다면 이 정도의 북상은 상당한 의미를 갖는다고 볼 수 있다. Fig. 10(B)에서 냉수는 겨울철에 서해안으로 가장 저위도까지 남하하여 분포하다가 여름철이 되면서 황해중앙부를 따라 분포함을 볼 수 있다.

이러한 해수분포의 계절 변화로부터 우리는 계절 해수순환을 유추할 수 있다. 즉 겨울철에 서해안을 따라 냉수가 남하하고 황해중앙부로 난류수가 북상하는 해수순환과, 여름철에 서해안을 따라 난류수가 북상하고 황해중앙부를 따라 냉수가 남하하는 해수순환을 하는 것으로 보인다.

— 황해난류

혼합비율을 통한 수괴 분석 결과, 여름철 서해의 혼합수는 난류수의 비율이 높은 혼합수이며, 서해안을 따라 고온고염의 난류수가 북상하여 연안수와의 혼합에 의해 형성된 해수임을 알 수 있었다. 이 결과는 새로운 것으로서 황해난류의 존재를 파악할 수 있는 중요한 문제이다. 따라서 이 절에서는 황해난류를 보다 깊게 다루어 보았다. 우선 여름철 난류수의 서해 유입이 다른 형태로는 나타나지 않는지 살펴보았다.

Fig. 11은 21년 평균 자료에 대해서 수심 50m의 해역별 T-S-time diagram을 나타낸 것이다. 해역별 T-S-time diagram은 2, 4, 6, 8, 10, 12월 자료가 한 T-S diagram상에 모두 표시되어 시간적으로 해수 특성이 어떻게 변화하는지를 한눈에 볼 수 있도록 한 것이다. 이 그림에서 서해의 수온은 월별로 크게 변하지만 염분 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 여름철에 많은 양의 담수 유입에도 불구하고 서해의 염분이 유지되고 있음을 보여주며, 고염의 난류수가 공급되고 있다는 것을 보여준다.

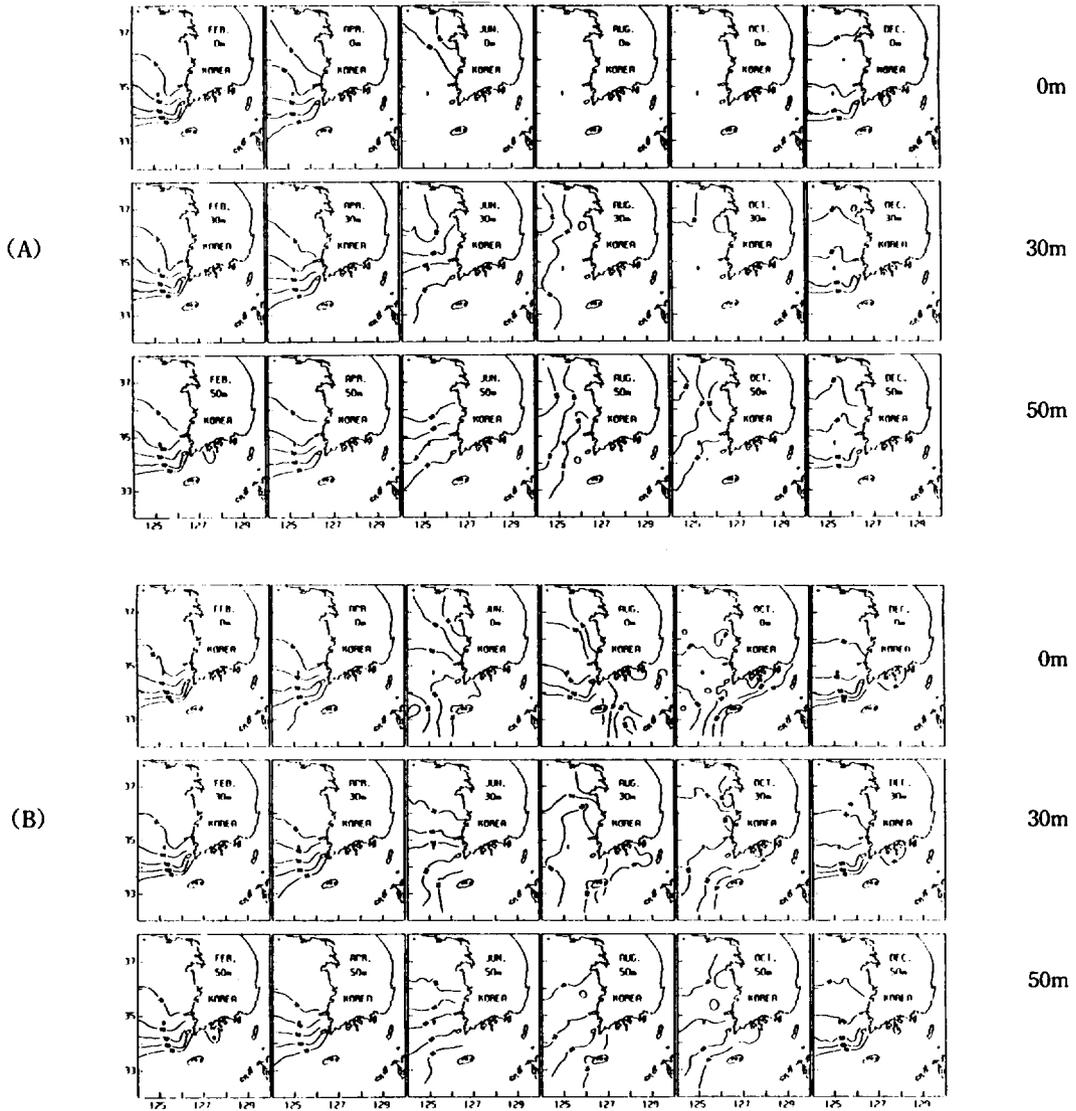


Fig. 9. Bimonthly spatial variation of the mixing rates of (A) cold waters (YSCW) and (B) warm waters (TSW+TDW) in the depths of 0, 30 and 50m.

Fig. 12는 각 관측점별로 21년간 전체 자료의 빈도수에 대해 33.7% 이상이 고염수가 출현하는 빈도수를 백분율로 나타낸 다음, 이를 수평분포도로 나타낸 것이다. 33.7%이란 수치는 남·서해에서 겨울철에 고염수와 저염수를 구분하는 염분 경계로 택한 값이다. 이 그림을 보면 2월에 35°N 이북에는 고염수의 수치가 나타나지 않는데 비해, 8월에는 수치는 작지만 37°N까지 수치가 나타난다. 4월, 6월의 그림은 겨울철에서 여름철로, 10월, 12

월의 그림은 여름철에서 겨울철로 고염수 분포가 변화하는 과정을 보여준다. 여름철의 담수 유입에도 불구하고 겨울철에 나타나지 않던 고염이 여름철에 관측되었다는 것은 고염수의 복상을 보여주는 또 다른 증거이다. 이것은 황해로의 염분공급이 확산(diffusion)에 의해 이루어지는 것(Lee and Kim, 1989)이 아니라 고염수(난류수)의 복상에 의한 것임을 보여준다. 이러한 난류의 복상은 서해 중부에서 난류성 어류나 플랑크톤이 발견되는 현

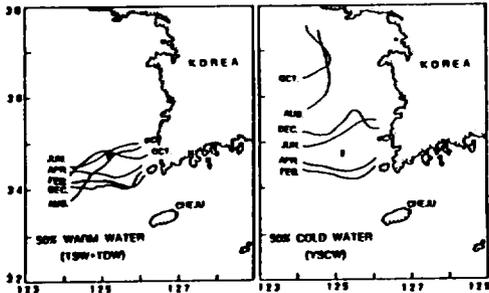


Fig. 10. Bimonthly spatial variation of the mixing lines 50% of (A) warm waters and (B) cold waters at 50m.

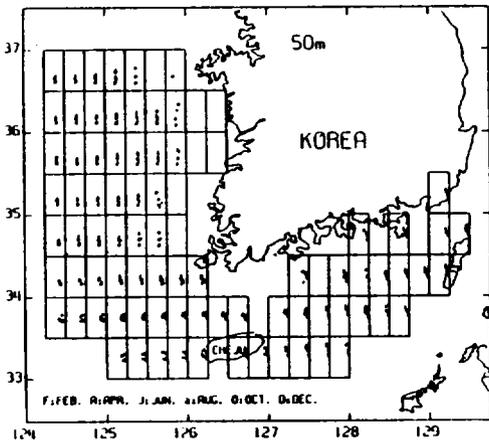


Fig. 11. Spatial T-S-time diagrams with the mean temperatures and salinities at 50m.

상(심 등, 1988)을 잘 설명해 준다.

홍도 근방에서 1983년에 한국해양연구소에서 관측한 해류자료(KORDI, 1987)는 난류수의 북상이 실제로 관측될 수 있음을 보여주는 좋은 예이다. Fig. 13은 34°35'N, 125°17'E에서, 수심 20m에서 1983년 6월22일~8월6일까지 15분 간격으로 관측한 해류 자료에서 장주기성분을 제거한 유속과 유향을 나타낸 것이다. 이 자료에 따르면, 여름철에 이 해역에는 약 10cm/s 내외의 유속을 갖는 북상류가 꾸준히 계속되고 있음을 알 수 있다.

여름철에 서해안을 따라 난류수가 북상하여 서해로 유입한다는 연구 결과는 역풍류이론(Csanady, 1982; Park, 1986a)에 근거하여 Pang et al. (1992)이 제안한 황해와 동중국해의 계절 순환이

론을 잘 뒷받침 해준다. 계절 순환의 역학적 원인으로서는 계절풍(김, 1990), 해저 지형과 쿠로시오의 장주기 변동(방과 오, 1995), 열 수지(熱收支)(문, 1993) 등으로 알려지고 있으나, 이에 대한 세부적인 연구는 앞으로 계속되어야 할 것이다.

앞으로 연구되어야 할 과제지만 현재까지의 결과로 본다면, 겨울철에는 서해안에서 냉수가 남하하고 황해중앙부로 난류수가 북상하며, 여름철에는 서해안을 따라 냉수가 남하하고 황해중앙부를 따라 냉수가 남하하는 계절 해수순환에 의해, 겨울철에는 황해중앙부로, 여름철에는 서해안으로 북상하는 고온고염의 해수를 '황해난류수'(Yellow Sea Warm Waters)로 정의해야 할 것으로 보인다.

이러한 정의에 따라 황해난류수의 특성범위를 자료로부터 정해보았다(Table 3). 겨울철에는 냉수와 난류수의 경계 범위(Table 1)에 해당하는 값으로, 여름철에는 21년 평균 자료에 대한 수평 분포도로부터 설정한 결과, 황해난류수는 겨울철에는 수온 9~10°C, 염분 33.2~33.7‰ 범위를 보이며 제주도에서 산동반도쪽으로 설상으로 분포하고, 여름철(8월)에는 14~15°C, 33.0~33.4‰ 범위를 가지며 서해안과 한반도 남서해역의 하층에 주로 분포한다.

결론

여름철에 난류수(고염)가 서해(황해의 우리나라 연안)로 유입되는지의 문제는 서해와 남해 사이에 형성되는 염분전선으로 인해 유입되지 않는다는 것이 일반적인 생각이었다. 그러나 이 해역에는 여름철에 많은 강수량의 유입으로 저염화됨과 아울러 강한 조석혼합으로 인해 하층의 염분은 더욱 낮아지기 때문에 고염의 해수가 유입된다 하더라도 그 양이 많지 않은 한 염분전선은 형성될 수밖에 없다. 염분에 비해 수온은 모든 해역이 비슷한 정도로 기상 영향을 받기 때문에 이러한 경우에는 염분보다 믿을 수 있는 자료로 볼 수 있다. 조석혼합으로 수온도 상층과 하층의 분포가 전혀 다르지만 하층의 수온을 보면 제주해협에서 서해로 난류수가 연결된다. 이와 같이 수온과 염분이 다른 양상을 보이는 것을 어떻게 해결하느냐의 문제는 이 해역의 순환을 파악하는데 중요한 과제이다. 황해의 순환은 매우 약한 흐름이므로 이 문제를 해류자료로 해결하려는 것도 쉽지 않다. 이는

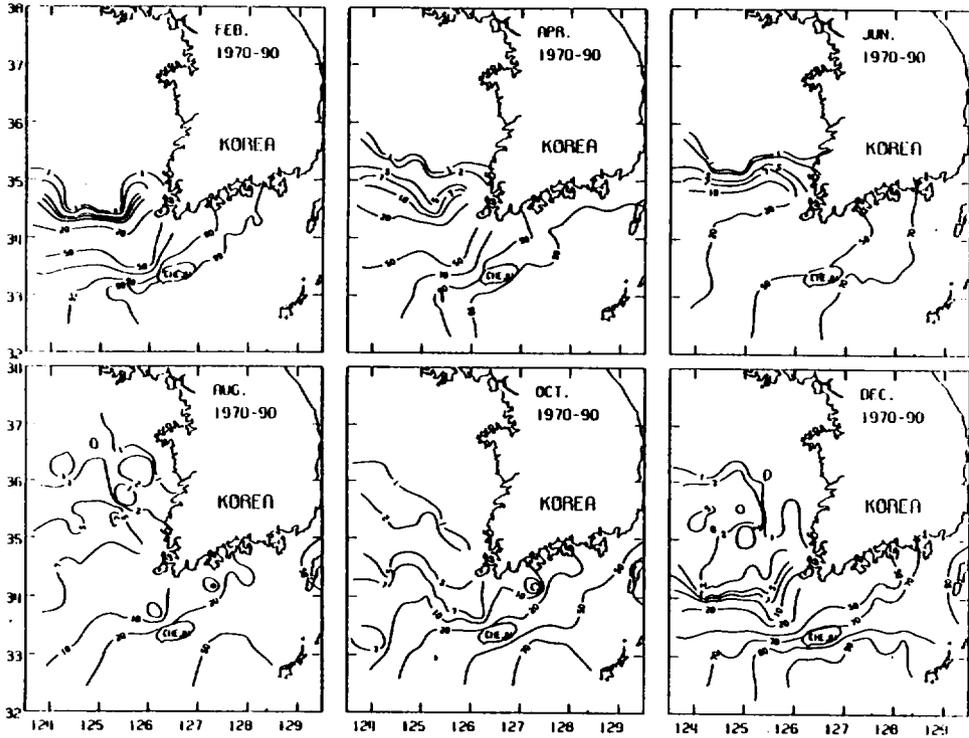


Fig. 12. Distributions of the appearance rates of saline waters over 33.7‰ during 1970~1990. The contours show the northern limits of saline waters in the West Sea.

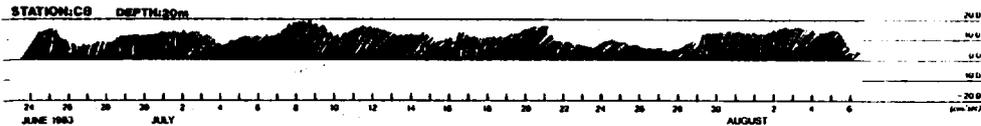


Fig. 13. Low-pass filtered velocity vectors plotted each hour from June 22 to August 6, 1983 at the place of 34°35'N, 125°17'E at 20m (after KORDI, 1987).

Table 3. Characteristic ranges of Yellow Sea Warm Waters

| Season | Month | T(°C) | S(‰) | Depth | Area |
|--------|-----------|-------|-----------|-------------|--------------------------------|
| winter | Feb.~Apr. | 9~10 | 33.2~33.7 | all layer | the central region of the YS |
| | Dec. | 13~14 | | | |
| Summer | Jun. | 12~15 | 33.0~33.7 | lower layer | the south-western sea of Korea |
| | Aug. | 14~15 | 33.0~33.4 | | |
| | Oct. | 14~16 | | | |

문에서는 이 문제를 장기간의 특성자료(국립수산진흥원의 21년간 자료)로 해수분포의 계절 변화와 수괴 분석을 통해 연구하였다.

겨울철 하층의 해수분포는 서해에 냉수(저온저염), 제주도 주변해역에 난류수(고온고염)가 분포하며 난류수는 황해중앙부로 연결되는 형태를 보

이다. 그러나 여름철에는 이 형태가 바뀌어 황해 중앙부에 냉수가 자리잡아 난류수의 분포를 제주도 주변해역으로 국한시키며 서해에는 반면에 난류수(혼합수)가 자리잡는다. 이와 같이 계절에 따라 반대의 분포를 갖는 것은 확산과 같은 다른 요인으로는 해석하기 어렵고 이 해역에 계절 순환이 있다는 것을 보여준다. 문제는 여름철 서해에 분포하는 난류수가 태양열에 의한 것이나 아니면 제주도 주변해역으로부터 공급된 난류수에 의한 것이나이다. 즉, 여름철 서해의 혼합수가 냉수와 연안수와의 혼합이나 아니면 제주도 주변해역의 난류수와 연안수와의 혼합이나이다.

이 문제는 연안수(CW), 황해냉수(YSCW), 대마난류심층수(TDW), 대마난류표층수(TSW)의 4개의 근원 수괴를 각 해수들이 어느 정도 함유했는지를 분석함으로써 해결해 보았다. 그 결과 서해 하층에서 겨울철에는 YSCW가 50~100%인데 비해 여름철에는 TSW+TDW가 40~60%로 나타나 겨울철에 냉수가 압도적으로 분포하던 서해에 여름철에는 제주해역의 난류수가 유입되고 있음을 알 수 있었다.

여름철에 서해로 난류수가 유입되고 있다는 것은 다른 방향에서도 찾을 수 있다. 서해 하층의 염분은 여름철에 많은 양의 강수가 유입됨에도 불구하고 연중 거의 일정하게 유지되는데, 이것은 제주도 주변해역으로부터 고염수의 공급 없이는 설명하기 힘들다. 또한 21년간의 자료에서 33.7% 이상의 고염수의 출현 빈도가 겨울철에는 35°N 이북에는 전혀 나타나지 않는데 비해 여름철에는 37°N 부근에까지 수치가 나타나 고염의 난류수가 북상한다는 것을 뚜렷이 보여준다.

이상의 결과는 겨울철에 서해를 따라 냉수가 남하하고 황해중앙부를 통해 난류수가 북상하며 여름철에는 반대로 서해를 따라 난류수가 북상하고 황해중앙부를 통해 냉수가 남하하는 계절 순환을 보여준다. 따라서 겨울철에는 황해중앙부를 따라, 여름철에는 서해를 따라 황해로 유입되는 난류수를 황해난류수(Yellow Sea Warm Waters)라고 정의해야 할 것으로 보인다.

요 약

남·서해의 계절순환과 여름철 난류수의 서해 유입

남·서해의 계절 순환과 여름철에 난류수가 서해(황해의 우리나라 연안)로 유입되는지를 알아보기 위해 국립수산진흥원의 장기간(1970~1990) 수온 염분자료로 혼합비율을 통한 수괴 분석을 하였다. 그 결과, 서해에서 겨울철에는 냉수가 압도적으로 분포하는데 비해 여름철에는 난류수의 비율이 40~60%인 혼합수가 분포하였다. 황해중앙부에는 겨울철에 난류수가 남쪽에서 연결되어 분포하는데 비해 여름철에는 냉수가 남북으로 분포하였다. 이러한 정반대의 해수분포는 계절 해수순환으로만 설명이 가능하다. 즉, 겨울철에는 서해안에서 냉수가 남하하고 난류수는 황해중앙부로 북상하고, 여름철에는 서해안을 따라 난류수가 북상하고 냉수는 황해중앙부를 따라 남하하는 계절 순환이다. 따라서 겨울철에는 황해중앙부로, 여름철에는 서해안을 따라 북상하는 난류수를 황해난류수라고 정의할 수 있다.

주요어 : 혼합비율, 수괴 분석, 계절 순환, 황해난류수

사 사

이 논문은 1997년 한국과학재단 핵심전문연구비(971-0403-011-1)와 1997년 과학기술처 연구비(PN 00336-3)로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 김태희, 1990. 황해와 동중국해의 해수순환에 대한 바람의 영향, 제주대학교 석사학위논문, 28~29.
- 문재인, 1993. 열수지로 본 겨울철 황해난류수의 북상, 제주대학교 석사학위논문, 29~30.
- 방익찬, 오임상, 1995. 해수면변화와 해저지형에 의한 난류수의 순환과 그 기원, *J. Kor. Fish. Soc.*, 28(5), 689.
- 심문보, 최중기, 김동엽, 1988. 황해 중동부역의 동물플랑크톤 분포에 관한 연구, *황해연구*, 1, 1~10.
- 윤용훈, 1986. 황해저층냉수의 특성규명과 남하중거, 제주대학교 석사학위논문, 55.
- 현경훈, 1996. 남·서해의 계절 순환과 여름철 난류수의 서해 유입, 제주대학교 석사학위 논문, 12~17

- Csanady, G. T. 1982. Circulation in the coastal ocean. *D. Reidal Pub. Co.*, 279
- Chen C.T.A., R. Ruo, S. C. Pai, C.T. Liu and G.T.F. Wong. 1993. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan, *Continental Shelf Res.*, 15 (1), 19~39.
- 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.
- Kondo, M. 1985. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea -1. Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50m and near the bottom, *Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab.*, No. 62, 19~66.
- KORDI(Korea Ocean Research & Development Institute). 1987. Oceanographic Atlas of Korean Waters. Vol. 1. Yellow Sea, 42~43.
- Lee, G.T. and K. Kim. 1989. A study on the eddy diffusion of salinity in the lower layer of the Yellow Sea.
- Lie, H.J. 1984. A note on water masses and general circulation in the Yellow Sea (Hwanghae), *J. Oceanog. Soc. Korea*, 19, 184~194.
- Lie, H.J. 1985. Wintertime temperature and salinity characteristics in the southwestern Hwanghae (Yellow Sea), *J. Oceanog. Soc. Korea*, 41, 281~291.
- Miller A.R. 1950. A study of mixing processes of the edge of the continental shelf, *J. Mar. Res.*, 9(2).
- Mamayev. O. I. 1975. Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters, *Elsevier Scientific Pub. Co.*, 11, 271~278.
- Nakao, T. 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea & the Yellow Sea, *J. Fac. Mar.Sci. Technol., Tokai Univ. Spec.*, Nov., 199~366.
- Pang I. C., H. K. Rho and T. H. Kim. 1992. Seasonal variations of water mass distributions and their causes in the Yellow Sea, the East China Sea and the adjacent seas of Cheju Islands, *Bull. Korean Fish. Soc.*, 25 (2), 151~163.
- Pang I. C., H. K. Rho, J. H. Lee, H. J. Lie. 1996. Water mass distributions and seasonal circulation northwest of Cheju Islands in 1994, *Bull. Korean Fish. Soc.*, 29(6), 862~875
- Pang I. C., T. H. Kim, T. Matsuno and H. K. Rho. 1993. On the origin of the Tsushima Current (I) : Barotropic Case. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 26 (6), 580~593.
- Park, Y. H. 1985. Some important summer oceanographic phenomena in the East China Sea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20(2), 12~21.
- Park, Y. H. 1986a. A simple theoretical model for the upwind flow in the southeastern 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. Oceanog.*, 17, 243~254.
- Seung, Y.-H., J.-H. Chung, Y.-C. Park, 1990. Oceanographic studies related to the tidal front in the mid-Yellow Sea off Korea : Physical aspects. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 25, 84~95.
- Youn Y. H., 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 Soc.*, 12(1), 25~37.