

여름철 동중국해의 수괴분석과 대마난류의 북상경로

현 경 훈 · 방 의 찬 · 이 재 학* · 노 홍 길**

제주대학교 해양학과 *한국해양연구소 해양물리연구부 **제주대학교 어업학과

Water Mass Analysis in the East China Sea in Summer and the Northward Route of the Tsushima Current

Kyung-Hoon Hyun, Ig-Chan Pang, Jae-Hak Lee* and Hong-Kil Rho**

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

**Physical Oceanography Division, Korea Ocean Research & Development Institutes,*

Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

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

In order to approach the problem on the branch of the Tsushima Current, water mass analysis and geostrophic calculation are performed with temperature and salinity data observed in the East China Sea in summer, 1994. A Kuroshio branch seems to be separated from the main stream west of Kyushu by detecting high salinity core. Water mass analysis is applied to check if the branch supply the major Tsushima Waters in the west channel of the Straits of Korea. The Tsushima Waters in the west channel of the Straits of Korea in summer have high salinity of 34.0-34.55‰ at the bottom and warm and diluted waters in the surface, which can be classified into "mixed waters" according to T-S curves. Mixing ratio calculation shows the Tsushima Waters has 50-85% ratios of KSW (Kuroshio Surface Waters) + KMW (Kuroshio Middle Waters), which occupy the whole areas of the eastern East China Sea shelf. Through the geostrophic calculation, the northward Kuroshio branch separated west of Kyushu turns west of Goto Islands and goes southward along the isobaths, which makes the clockwise eddy. High salinity waters distributed in the triangle area of Cheju-Goto-Tsushima Island does not seem to pass the west channel of the Straits of Korea. Finally, the Tsushima Waters in the west channel of the Straits of Korea mainly comes from the isobaths around 100m in the East China Sea via the adjacent seas of Cheju Island.

Key words : Tsushima Current, water mass analysis, geostrophic calculation

서 론

쿠로시오는 타이완 동부해역을 통해 동중국해로 들어와 대륙사면을 따라 북동진하여 대부분은

큐슈 남쪽의 도까라 해협을 통해 태평양으로 빠져나가고 일부는 대마난류로 분지하여 대한해협과 황해로 북상한다고 알려져 있다(Uda, 1934; Nitani, 1972; Kondo, 1985; Lie and Cho, 1994). 그러나 대마난류는 대만난류에 연장하여 대륙봉

을 따라 흘러 동해로 빠져나간다고 하는 의견도 있다(Beardsley et al., 1985).

대마난류의 분지에 관한 문제의 초점은 과연 고염의 난류수가 동중국해의 등수심선을 따라가는가 혹은 등수심선을 가로질러 분지하는가하는 역학적인 문제에 있다. 수심 500m가 넘는 큐슈남서해역에 있던 고염의 난류수가 수심 100m 안팎의 제주도 주변해역과 수심 150m 이하의 대한해협으로 북상하려면 150-500m의 등수심선을 가로질러야 하는데 이것이 역학적으로 가능한가하는 의문이 생기는 것이다. 대마난류를 발생시키는 역학적 힘으로 제시되는 것으로 대한해협과 도카라해협사이의 해수면차(Minato and Kimura, 1980), Reynolds stress (Ichiye, 1984)와 경압해류(Hsueh et al., 1996)를 들고 있다. 하지만 Pang et al.(1993)은 대마난류는 외부의 힘에 의해서가 아니라 자신의 역학에 의해서 발생하며 동중국해의 등수심선을 따라 제주도 주변해역을 거쳐 대한해협에 이를 수 있다고 하였다.

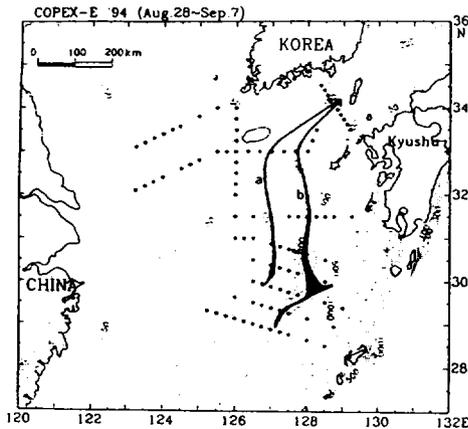


Fig. 1. Schematic representation of the path of the Tsushima Current based on (a) isosalinity line and (b) high salinity core (after Lee(1995))

Fig. 1은 Lee(1995)가 수괴분석을 통해 제시한 대마난류의 분지모습이다. 그림에서 a선은 34.57%의 등염분선이고 b선은 각 관측정선에서 최고 염분의 축을 표시한 선으로 전자는 대마난류수

근원이 가능한 대륙붕쪽의 경계에 해당하고 후자는 쿠로시오로부터 직접 분리된 대마난류의 고염핵이라고 하였다. 따라서 고염의 대마난류수는 a선과 b선 사이의 100m 깊이를 중심으로 존재하며 대한해협의 서수도로 연결된다고 하였다. 그런데 흥미롭게도 이 그림은 대마난류의 분지에 관한 두 가지 가능성을 모두 보여주고 있다. a선은 대략 동중국해의 100m 등수심선을 따라 북상하면서 제주도 주변해역을 거쳐 대한해협의 서수도에 이르고 있고, b선은 수심 500m보다 깊은 큐슈남서해역에서 쿠로시오로부터 분지하여 등수심선을 비스듬하게 가로지르면서 수심 100m내외의 대한해협 서수도에 도달하고 있다. 그렇다면 대한해협의 서수도를 통과하는 고염수의 주 공급원은 등수심선을 따라 북상하는 a선인가 혹은 등수심선을 가로지르는 b선인가하는 의문이 생긴다. Lee(1995)는 고염의 대마난류수는 북상하면서 주변해수와 혼합에 의해 저염화되기 때문에 최초 34.7%이상이던 것이 서수도를 통과할때는 34.6%이하로 염분이 낮아지는 b선이 대마난류수의 북상경로에 보다 가깝다고 하였다. 하지만 35.57%의 등염분선인 a선도 주변해수와 혼합이 있기 전까지는 상당한 고염분 해수였다는 유추가 가능하기 때문에 고염분에 대한 추적만으로 대마난류수의 경로를 이야기하는 것은 약간의 무리가 있는 것으로 보인다. 결국 대마난류가 쿠로시오로부터 분지한다면 b선을 따라 등수심선을 가로질러 북상하여 대한해협 서수도로 고염수를 공급할 것이고, 동중국해의 등수심선을 따라 북상한다면 a선을 따라 제주도 주변해역을 지나 서수도에 이를 것이다. 따라서 서수도로 연결되는 대마난류수의 주공급원을 결정하는 것이 대마난류의 분지와 북상경로를 파악하는 열쇠가 될 것으로 보인다.

대마난류의 분지에 관한 문제는 동중국해의 해수순환을 파악하는데 매우 중요할 뿐만아니라 해역내의 다른 순환과도 연관되기 때문에 먼저 해결해야 할 해양학적 과제이다. 이 논문에서는 대마난류의 분지에 대한 문제를 수괴분석에 의한 방법으로 접근하였다. 수괴분석은 해류계나 부이추적과같이 해수의 유동을 직접 설명해주지는 않지만 고염수의 분포와 동중국해의 수괴특성, 대한해협으로 연결되는 수괴의 특성들을 분석하므로

여름철 동중국해의 수괴분석과 대마난류의 북상경로

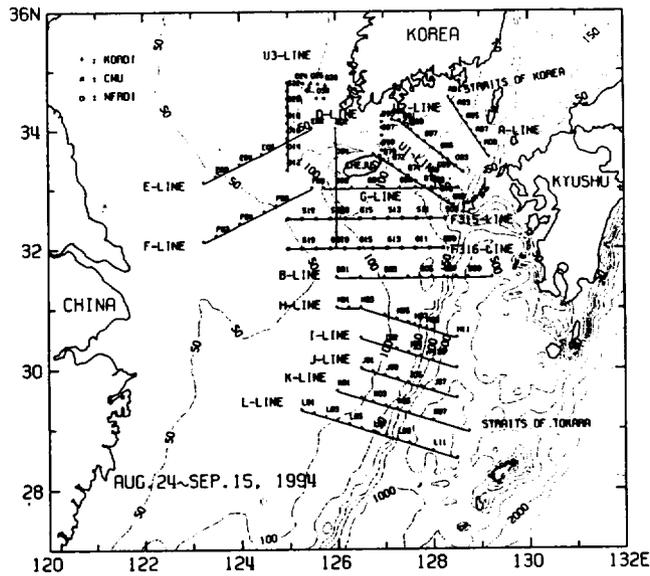


Fig. 2. Hydrographic stations of the study area observed by Korea Ocean Research & Development Institutes(KORDI) during Aug. 28-Sept. 7, 1994, by Cheju National University(CNU) during Sept. 6-15, 1994 and by National Fisheries Research & Development Institutes(NFRDI) during Aug. 24-25, 1994

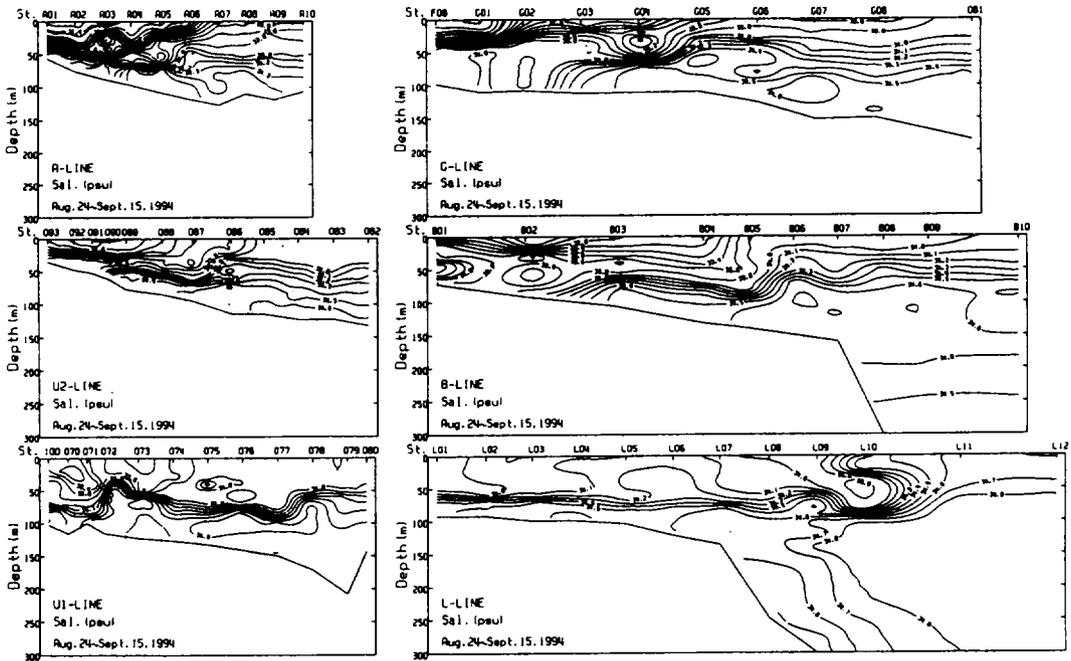


Fig. 3. Vertical distribution of salinities in the section A, U2, U1, G, B and L in summer

서 해수의 유동을 간접적으로 시사해 줄 수 있을 것으로 보인다. 동중국해에 대한 수괴분석은 Sawara and Hanzawa(1979)의 방법을 가지고 Shin(1994)이 4 계절의 자료에 대해서 자세히 분석하였으나 이 논문에서는 수괴구분이 어려운 혼합수에 대한 수괴분석에 집중하였다.

수괴분석에 사용된 자료는 Fig. 1의 해양연구소 자료에 제주대학교와 국립수산진흥원의 자료를 추가하였다. Fig. 2는 자료에 대한 관측점, 관측정선을 나타낸 그림이다. 해양연구소 자료만으로는 B-line에서 G-line 사이, G-line에서 대한해협을 A-line 사이가 너무 멀리 떨어져 있어 대한해협의 서수도를 통과하는 대마난류수의 연결을 설명하기 어렵기 때문에 제주대와 수산진흥원의 자료를 추가하였다. 국립수산진흥원자료는 표준심으로 관측된 자료, 제주대와 해양연구소의 자료는 수심 1m간격의 CTD자료를 사용하였다. 총 관측기간은 8월24일-9월15일로 23일이고 각 관측정선은 1일 이내에 관측되었는데, 짧은 기간에 넓은 해역에 걸쳐 관측된 귀중한 자료이다.

큐슈 서쪽에서의 쿠로시오 분지

Fig. 3은 각 관측정선별 염분의 수직단면을 나타낸 것이다. L-line에서는 대양의 바깥에서 대륙사면쪽으로 고염수가 파고드는 듯한 염분분포를 보이는데 B-line에서는 대륙붕단을 중심으로 34.6%이상의 고염수가 뭉쳐있다. 이 고염수는 G-line, U1-line, U2-line의 저층으로 이어지고 있고 대한해협의 A-line 저층에서는 34.5-34.55%의 고염수로 연결되고 있는 것으로 보여 Fig. 1의 b경로를 지지해 주는 대마난류의 분지의 좋은 증거로 여겨지고 있다. 이처럼 고염핵에 대한 추적결과 큐슈 서쪽의 H-line과 B-line에서 쿠로시오는 분지하는 것으로 나타난다. Fig. 4는 각 관측점별로 수심에 관계없이 가장 고염인 값을 택하여 수평분포로 나타낸 그림이다. 이 그림에서도 34.65%의 등염분선은 고오펀도 서쪽까지 뻗어 올라가 있어 대륙사면을 따라 도까라 해협으로 향하는 34.8%이상의 쿠로시오 주축으로부터 분지되고 있음을 잘 보여준다. 그리고 제주도-대마도-고오펀도를 잇는 이 삼각해역에는 34.4-34.65%의 상당히 고염인 해수들이 자리잡고 있어 큐슈 서쪽에서 쿠로시오로부터 분지한 고염수와 연결되는 것으로 보인다.

그렇다면 문제는 큐슈서쪽에서 분지하는 이 쿠로시오의 지류를 "대마난류"로 볼 것인가 하는

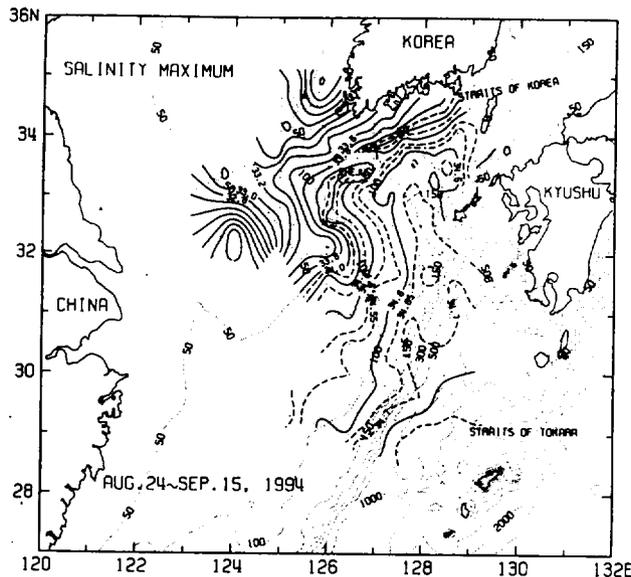


Fig. 4. Horizontal distribution of salinity maximum at each stations in summer

것이다. "대마난류"는 주로 대한해협을 서수도를 통과하여 동해로 빠져나가는 해류이다. Fig. 4에서 여름철 대한해협을 통과하는 해수의 최고염분은 대략 34.0- 34.55‰로 나타나고 있고 34.6‰이상의 고염수는 대한해협을 통과하지 않는 것으로 나타난다. 만일 고오펜열도까지 복상한 34.65‰의 고염수가 대한해협을 서수도로 직접 연결되지 않는다면 이 쿠로시오의 지류는 "대마난류"라고 할 수는 없을 것이다. Lee(1995)는 대한해협 서수도로 34.6‰이상의 고염수가 통과하지 않는 원인을 고염수가 복상하면서 주변해수와의 혼합에 의해서 저염화되기 때문이라고 하였다. 그렇다면 34.0-34.5‰의 등염분선은 대략 100m내외의 등수

심선을 따라가는데 왜 처음보다 저염화되지 않고 대한해협을 서수도로 연결되는 것일까? 이처럼 고염분에 대한 추적만으로는 대한해협을 서수도를 통과하는 대마난류의 주 공급경로를 결정하기 어렵기 때문에 보다 자세한 수괴분석을 시도하여 보았다.

수괴분포

여름철 동중국해의 수온과 염분 수평분포를 표층과 저층으로 구분하여 나타낸 그림이 Fig. 5이다. 표층수온은 한국 남해연안에서 20-23°C 저온

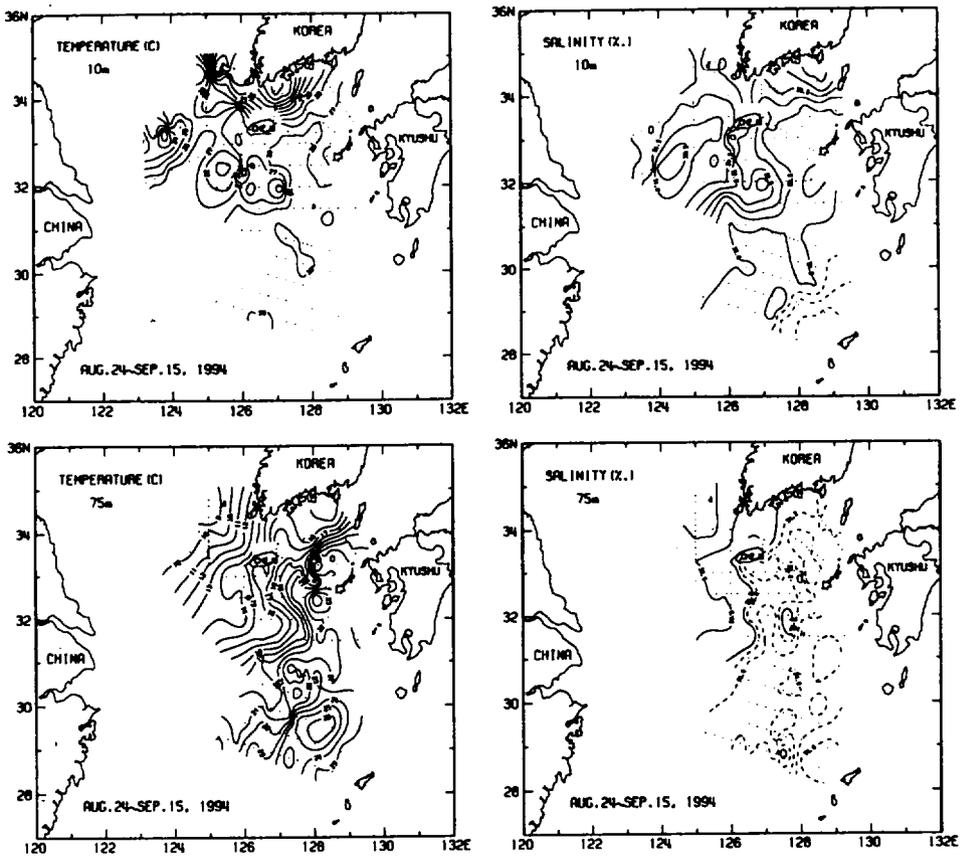


Fig. 5. Horizontal distribution of temperatures and salinities at the surface and in the lower layer (75m) in the East China Sea in summer

수가 분포하고, 제주도 서부와 동부해역에서는 26-27°C, 기타 동중국해 동부해역 전반에 걸쳐 28-29°C 이상의 고온수가 분포한다. 표층염분은 제주도 서부해역에서 30-32‰, 한국 남해안 부근 해역에서 31.2‰ 내외의 저염수가 분포한다. 동경 128° E 이서해역과 북위 31° N 이북해역에서 33.6‰이하의 저염수가 분포하고, 동중국해 동부해역 전반에 걸쳐 33.8-34.0‰의 균질한 고염수가 분포하고 있다. 저층인 75m 수심에서 수온은 북위 33° N 이북, 125° E 이서의 황해중앙역에 10°C이하의 냉수가 분포하고, 북위 31° N, 동경 128° E 부근에서 대마도로 이어지는 해역을 중심으로 등온선 간격이 조밀한 수온전선이 형성되고 있다. 염분분포는 제주도 남쪽을 남북으로 가르는 선을 따라 34‰의 등염분선이 그려지는데 그 동쪽은 34.0-34.5‰의 고염수가 분포하고, 그 이서로는 33.0-33.8‰로 상대적으로 저염수가 분포한다.

수괴의 구분

Fig. 6은 전체자료를 T-S diagram에 나타낸 것이다. 황해와 제주도 서부해역에서는 비스듬한 직선형태를 나타내고, 쿠로시오 해역으로 갈수록 중간이 볼록한 곡선형태를 보인다. 이는 황해 등 내해에서는 수심이 깊어지면서 수온 감소와 염분 증가가 뚜렷한데 비해, 쿠로시오 해역에서는 수심이 깊어질수록 수온은 일정하게 감소하지만 염분은 중층에서 가장 높고 심층으로 갈수록 염분이 감소하다가 다시 저층에서 약간 증가하고 있기 때문이다.

Fig. 7은 T-S 곡선의 형태에 따라 6가지로 구분해 본 것이다. Type-1은 외양수의 영향은 받지 않는 황해와 동중국해의 고유해수로 볼 수 있고, Type-6은 전형적인 쿠로시오 해수의 T-S형태를 나타낸다. 이 논문에서는 Type-1을 "내해수형", Type-6을 "쿠로시오수형"으로 정의하였다. Type-5는 쿠로시오의 영향을 직접 받지만 수심이 낮아 쿠로시오 심층수는 나타나지 않는 "난류수형"으로 보았다. Type-2는 내해수형보다는 수온과 염분이 조금 높은 혼합수형이다. Type-3은 해수특성이 수심별로 복잡한 형태를 나타내며 3개 이상

의 층을 이루고 있는 혼합수형이다. Type-4는 표층과 저층은 고염수의 영향을 받고, 중층에서는 저온저염인 냉수의 영향을 받는 형태로서 역시 3개 이상의 층을 형성하고 있다. 이처럼 Type-2, 3, 4는 내해수와 쿠로시오 기원의 난류수가 서로 만나 혼합하여 복잡한 형태를 보이는 것인데, 이러한 형태를 "혼합수형"으로 정의하였다.

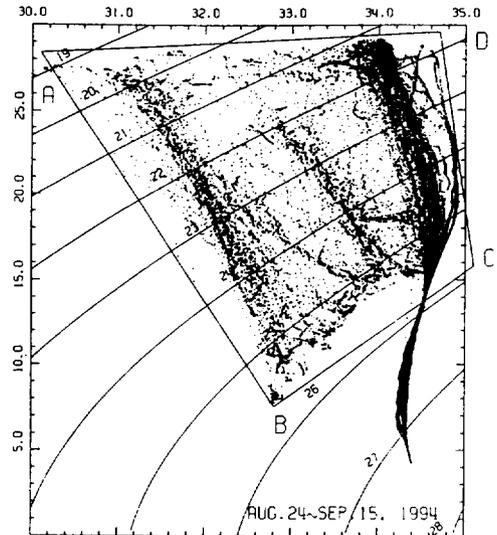


Fig. 6. T-S diagram of total data observed in the East China Sea in summer. Each four angular points represent four source water masses (A : Coastal Waters, B: Bottom Cold Waters, C : Kuroshio Middle Waters, D: Kuroshio Surface Waters.)

Fig. 8의 해역별 T-S diagram은 Fig. 7에서 나타난 6가지의 T-S 곡선의 형태에 따라 구분한 수괴들이 공간적으로 어떻게 분포하는지 잘 보여준다. 쿠로시오수는 동중국해 대륙사면의 동쪽에 위치하고 있고 난류수형은 동중국해 남동부해역에서 대한해협까지 전역에 분포하고 있다. "난류수형"인 경우 H-line 이남에서는 가장 서쪽의 관측점에서도 난류수형을 보이는데, B-line, F316-line에서는 동쪽으로 치우쳐 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 이 해역의 서쪽으로부터 양자강연안

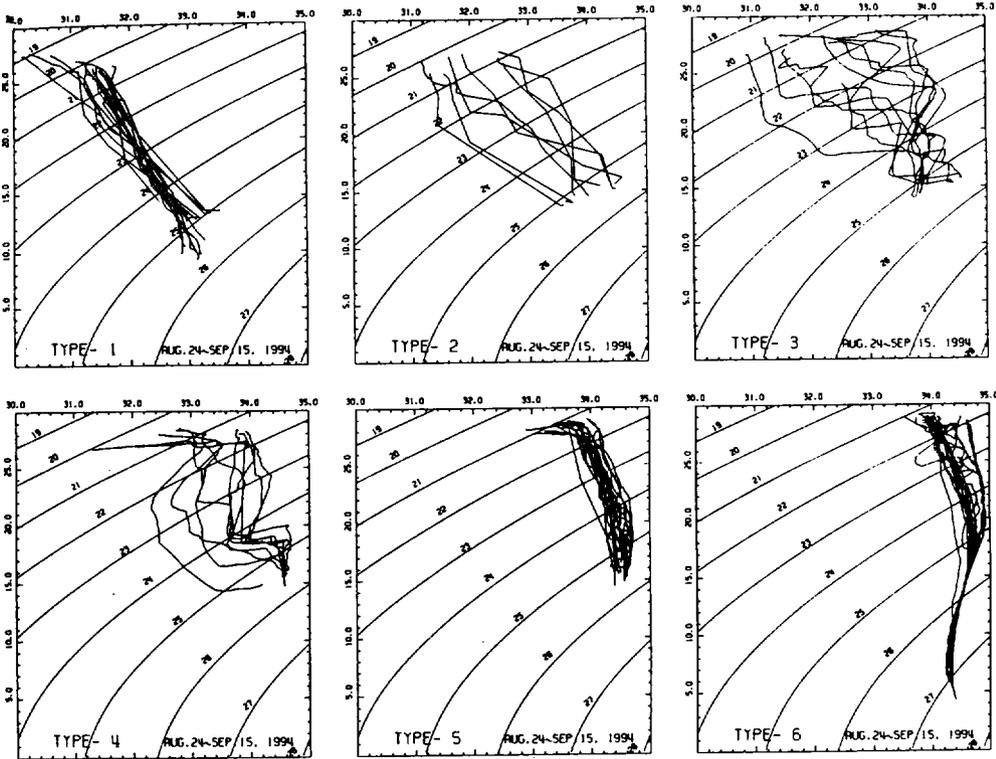


Fig. 7. Six types of T-S curves in the East China Sea in summer

수가 영향을 주기 때문으로 보인다. 그리고 “내해수형”은 황해와 제주도 남서부해역에 분포하고 있고, “혼합수형”은 제주도 남부에서 남해, 대한해협 서수도에 분포하고 있다. 이러한 결과로 볼 때 대한해협 서수도에 분포하는 해수는 “혼합수형”으로 구분할 수 있을 것으로 보인다. 이 혼합수 해역은 난류수와 내해수가 만나는 해역이기 때문에 난류수의 경로 및 북상한계를 파악하는데 매우 중요하다. 따라서 다음 절에서는 “혼합수형”을 다시 세분하여 분석하고 수괴들의 혼합비율을 계산하여 보았다.

수괴들의 혼합

Fig. 9는 앞 절에 나타난 “혼합수형”을 다시 6개의 혼합수형(Mixed Water-1~6)으로 세분하여 나타낸 그림이다. 각각의 혼합수형들은 매우 독특

한 형태를 보이는데 이는 성질이 다른 수괴들이 서로 만나 혼합하기 때문인 것으로 보인다. MW-1은 “내해수형”과 비슷한 형태이나 내해수형보다는 비교적 고염인 해수가 저층에 존재하고 중층에서도 성질이 다른 수괴의 영향을 받지만, 기본적으로는 “내해수형”의 특성을 유지하고 있는 혼합수형으로 “\”자형을 보인다. MW-2는 저층에 34%내외의 고염수가 존재하고 T-S 곡선이 세 번이상 꺾이는 “계단형”을 나타낸다. 이 형태는 표층에 저염의 연안수가 저층에 고염의 난류수가 분포하고 중간에는 두 개이상의 이질적인 수괴를 가지고 있는 복잡한 형태이다. MW-3은 수심이 깊어질수록 염분만 계속 높아지다가 어느 수심이 되면 깊어질수록 수온만 낮아지는 “-”자형의 T-S 곡선이다. 따라서 중층에서 저층까지 비교적 고염인 해수가 분포하며 해역에 따라 저층의 바로 위 수심에서 냉수의 영향이 나타나는 형태도 있다. MW-4는 표층에는 33-34%의 비교

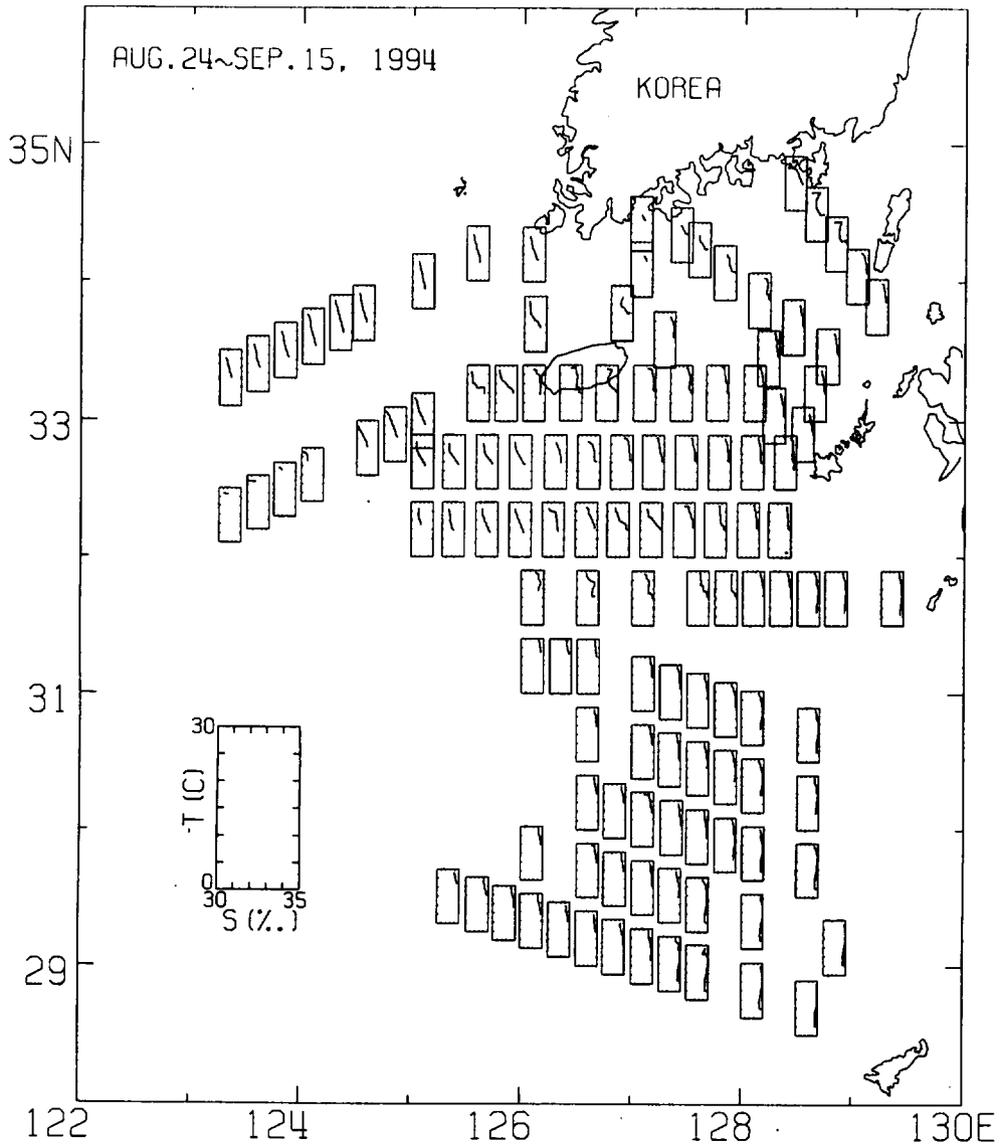


Fig. 8. Local T-S diagrams at each stations in the East China Sea in summer

적 고염인 해수, 저층에는 매우 고염인 해수가 분포하고 중층에서는 내해수의 영향을 약하게 받는 "C"자형을 나타낸다. MW-5는 표층염분이 급격하게 높아지고 저층에 고염수가 존재하는 것은 "D"자형과 같으나 중층에서 냉수의 영향을 강하게 받는 "E"자형의 T-S 곡선을 나타낸다. MW-6 형태는 표층에 비교적 고염수가 분포하고 저층에

도 고염수가 분포하고 분포하지만 저층의 바로 위에서는 냉수의 영향이 뚜렷하여, 표층과 중층은 수온약층으로 중층과 저층은 염분약층으로 뚜렷이 구분되는 "y"자형을 나타낸다.

Fig. 10은 T-S 곡선으로 구분한 6개의 혼합수형을 수직적인 모식도로 나타낸 것이다. 이처럼 혼합수해역의 표층에는 고온저염수, 저층에는 저

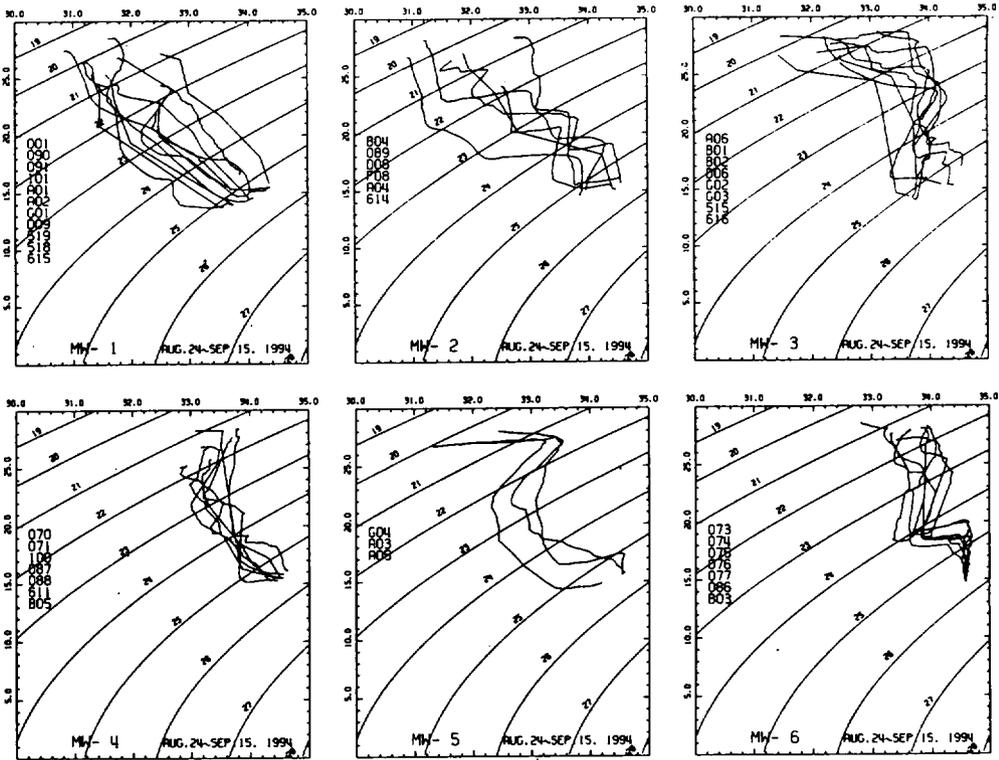


Fig. 9. Detailed mixed water types of T-S curves in the mixed area in the East China Sea in summer

은고염수가 주로 분포하면서 중층에서 연안수, 냉수 혹은 고염수가 영향을 미치면서 혼합이 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 그런데 혼합수해역의 저층에는 34‰내외이거나 혹은 그이상의 고염수가 존재하는 것으로 보아 쿠로시오기원의 난류수가 혼합수해역까지 영향을 미치고 있는 것으로 볼 수 있다. 그리고 대한해협을 서수도를 통과하는 해수는 “ㄱ”자형이나 “계단형” 혹은 “乙”자형의 혼합수형을 나타낸다. 그리고 이러한 혼합수형들은 제주도과 대마도를 잇는 해역주변과 제주도 주변해역 및 제주도 남부해역에 주로 나타나고 있다. 그렇다면 혼합수해역의 저층에 존재하는 고염수는 어느 정도의 혼합비율을 갖는 난류수인가? 혼합비율을 구하기 위해 Hyun(1996)이 사용한 4 근원수괴의 혼합비율을 계산하는 방법을 적용하여 보았다.

혼합비율

- 계산방법 및 결과

네 근원수괴의 혼합비율을 계산하는 방법은 연안쪽에서 두 개의 수괴, 외양쪽에서 두 개의 수괴가 만나 주로 수평과 수직방향으로 혼합이 이루어져야 한다는 가정이 전제된다. 이 가정은 연구해역에 비교적 정확하게 들어맞는 것으로 보인다. 혼합비율을 계산하기 위해서는 근원수괴를 정하여 거리비율로 계산하게 되는데 자세한 방법은 Hyun(1996)에 정리되어 있다. 동중국해 대륙붕해역에서의 수괴들의 혼합에 초점을 치중하기 위하여 300m이심의 쿠로시오수는 계산에서 제외시켰다. Fig. 6에서 사각형의 꼭지점에 해당하는 점이 4 근원수괴가 된다. 4 근원수괴는 연안수(Coastal Water: CW), 저층냉수(Bottom Cold Water: BCW), 쿠로시오 중층수(Kuroshio Middle Water:

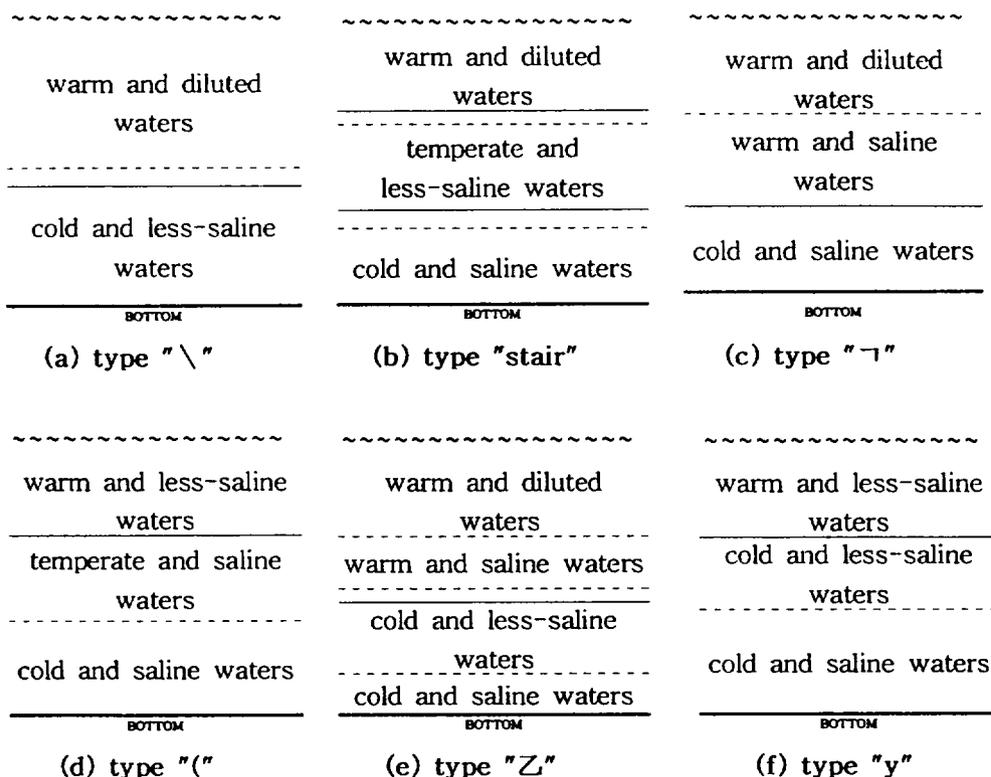


Fig. 10. Schematic vertical view of six types of T-S curves of Mixed Waters in the East China Sea in Summer (— : thermocline, - - - - : halocline)

Table 1. Representative T-S Values of Four Source Water Masses.

Water Type	Temp.(°C)	Sal.(%)	Source Water Masses
CW	28.0	30.0	Coastal Waters
BCW	7.5	32.8	Bottom Cold Waters
KMW	15.8	35.1	Kuroshio Middle Waters
KSW	29.6	34.7	Kuroshio Surface Waters

KMW), 쿠로시오 표층수(Kuroshio Surface Water: KSW)로 정하였고, 각 수괴의 대표값은 Table 1에 정리되어 있다.

Fig. 11은 관측점별로 4 근원수괴의 수심에 따른 혼합비율을 수직그래프로 나타낸 것이다. 연안수(CW)는 황해남부, 제주도 주변해역과 남해의 표층에 영향을 준다. 특히 제주도 남서해역에서 50-80%로 높게 나타나는 것은 양자강연안수의

영향으로 보인다. 이 양자강연안수의 영향은 위도 32° N을 중심으로 서에서 동으로 영향을 주는 것으로 보이며 쿠로시오 해역과 큐슈부근 해역으로 갈수록 연안수의 비율은 낮아지고 있다. 대한해협 표층에서도 연안수의 영향은 크게 나타난다. 저층냉수(BCW)는 황해남부의 저층에 주로 분포하고 제주도 남서부 해역에도 40%이하로 나타나고 있다. 이는 여름철에 제주도 남동방향으로 황

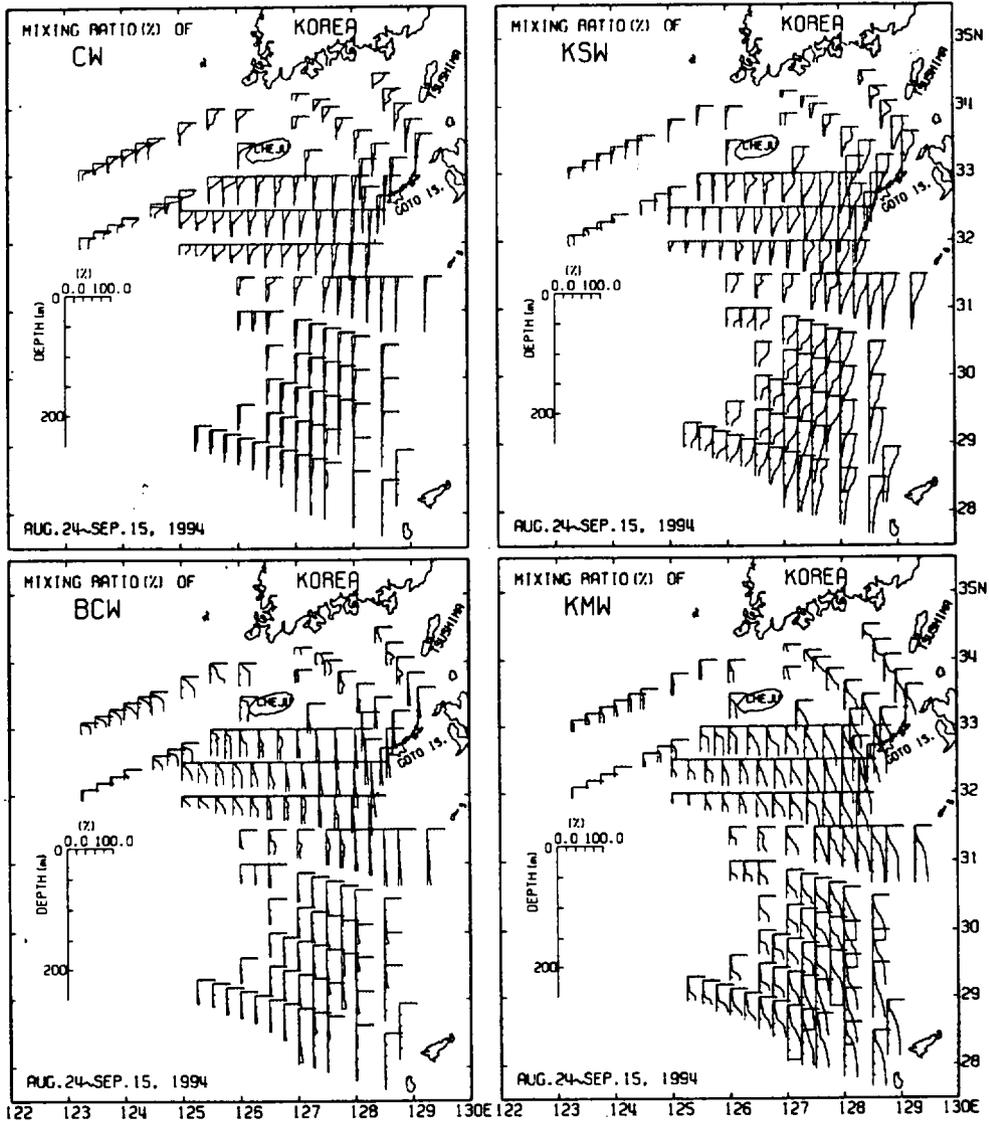


Fig. 11. Horizontal distribution of the mixing ratios of CW, BCW, KMW and KSW by depth

해저층냉수의 남하에 따른 영향으로 보이며 그 영향범위는 표층수와 비슷하게 32° N 동쪽해역까지 미친다. 대한해협에서 수심 50m 내외에서 냉수의 비율이 40%정도 나타나는 것은 동해로부터 오는 냉수의 영향으로 보인다. 쿠로시오 표층수(KSW)는 동중국해 동부해역 전반에 걸쳐 영향을 주고 있다. 연안수의 영향이 강한 제주도 남서해역과 남해안으로 갈수록 쿠로시오 표층수의 비

율은 줄어든다. 쿠로시오 중층수(KMW)도 동중국해 동부해역의 중층에 전반적인 영향을 주고 있고 제주도 부근의 남서부에서 40%내외로 나타나는 것으로 보아 여름철에 난류수가 제주도 주변해역을 거쳐 대한해협으로 연결되고 있음을 보여준다.

- 대한해협을 통과하는 난류수의 혼합비율

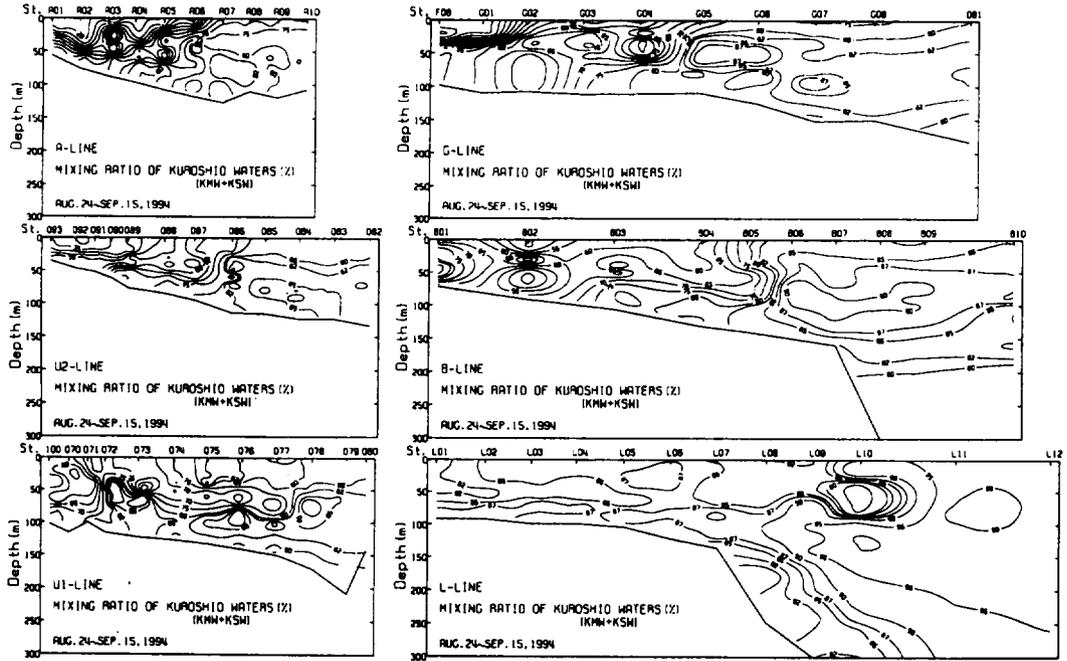


Fig. 12. Vertical distributions of the mixing ratios of KMW+KSW in the section A, U2, U1, G, B and L in summer.

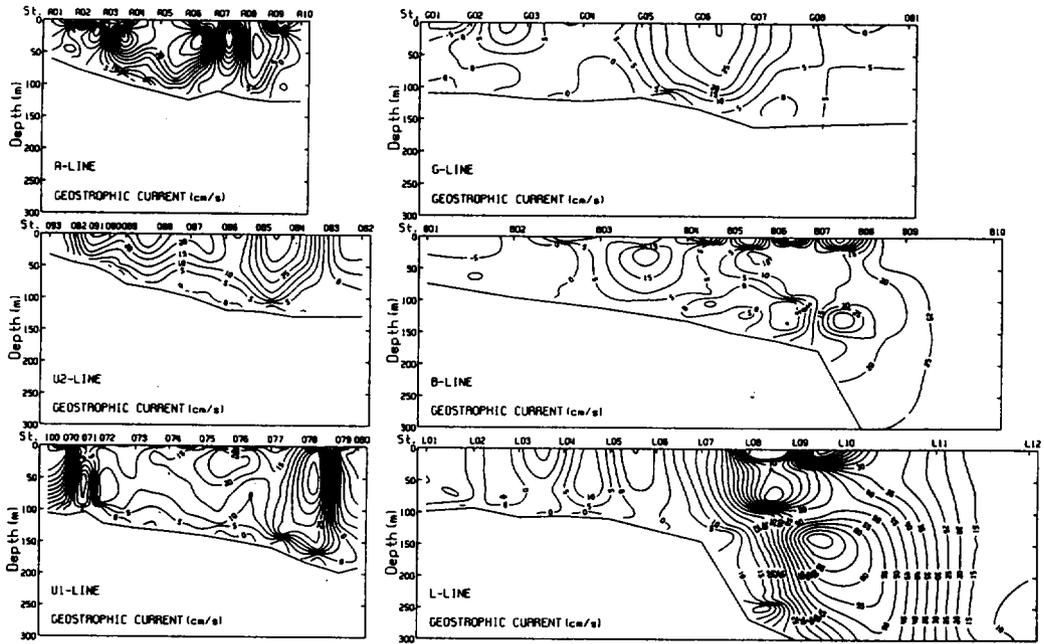


Fig. 13. Vertical distribution of geostrophic current in the section A, U2, U1, G, B and L in summer.

Fig. 12는 각 관측정선의 (KSW+KMW)의 혼합비율을 수직단면으로 나타낸 그림이다. (KSW+KMW)의 혼합비율 50%이상을 쿠로시오 기원의 난류수로 본다면 대한해협 부근인 A-line에서는 서수도와 동수도에 모두 난류수가 분포하고 있는데 혼합비율이 85%는 넘지 않는 것으로 보인다. 50-85%정도의 혼합비율을 갖는 해수는 각 단면에 모두 나타나며 동중국해의 대륙붕 전반에 걸쳐 분포하고 대륙사면에서는 85%가 넘는 혼합비율을 갖는 "쿠로시오수"가 분포하는 것으로 보인다. 그리고 B-line에서 대륙붕단을 중심으로 90%이상의 혼합비율을 나타내는 해수는 "쿠로시오수"로 보는 것이 타당할 것으로 보인다. 따라서 대한해협의 서수도를 통과하는 50-85%의 혼합비율을 갖는 쿠로시오 기원의 해수를 "대마난류수"로 정의한다면, 대마난류수는 제주도 동부해역과 남해 및 동중국해 동부해역 전반에 걸쳐 분포하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 혼합비율만으로 대마난류수의 북상을 설명한다면 어느 일정해역에서 고염수가 분지하여 북상하는 것이 아니라 동중국해의 대략 100-150m의 전 등수심선을 따라 북상하면서 제주도 주변해역을 거쳐 대한해협의 서수도를 연결된다고 할 수 있다.

지형류 계산

동중국해의 해수유동패턴을 알아보기 위해 각 관측정선별로 지형류를 계산하였다. 지형류계산은 대륙붕단과 같이 수심이 얇고 급격히 변하는 해역에서는 무류점을 설정하기가 쉽지 않아 전 수심의 지형류를 계산할 수 없다. 그러나 인접하는 두 관측점 사이의 수심의 차이는 그리 크기 않기 때문에 이 논문에서는 두 관측점 사이의 지형류를 계산하는 방법으로 유속을 계산해 보았다. 그때 무류점은 가장 저층으로 설정하였고 두 관측점의 수심이 다를 때에는 수심이 얇은 관측점의 저층을 선택하였다.

Fig. 13은 각 관측정선별로 지형류의 유속을 수직단면도로 나타낸 그림이다. L-line에서는 대륙사면 위로 30-75cm/sec의 강한 북류가 나타나고 있는데 이는 쿠로시오의 주축으로 보인다. B-line

의 지형류단면을 보면 L-line에 비해 유속이 많이 줄어들었으며 관측점 B07과 B08 사이의 100m층에서 30cm/sec이하의 북류가 나타나고 있다. G-line에서는 관측점 G05동쪽에서 북류가 나타나고 있고, U1-line에서는 관측점 75, 76과 관측점 78, 79에서, U2-line에서는 관측점 88, 89와 84, 85에서 북동류가 나타나고 있다. 대한해협부근의 A-line에서는 동수도에서는 약한 북동류가 A04-A06사이의 서수도에서는 30-45cm/sec의 강한 북동류가 나타나고 있다. 따라서 이 그림은 큐슈남서쪽에서 분지한 쿠로시오의 지류가 100-150m 등수심선을 가로질러 대한해협 서수도로 연결되고 있는 것처럼 보인다. 그런데 U1-line의 유속을 보면 관측점 78을 중심으로 강한 북상류가 나타나는데 약간 북쪽에 위치한 G-line의 관측점 G08과 81사이에서는 유속이 거의 나타나지 않고 있다. 지형류의 수송량을 수평으로 나타낸 Fig. 14를 보면 보다 분명해진다. U1-line의 고오도열도 근방에서는 북동방향의 많은 수송량을 나타내는데 비해 G-line의 끝에서는 수송량이 매우 작게 나타난다. 더구나 U1-line의 가장 끝에서는 남하 수송량이 나타나고 U1-line의 끝과 U2-line의 끝을 연결하는 선상에서는 남동방향의 수송량을 나타내는 것이다. 이러한 지형류 계산 결과는 큐슈서쪽에서 분지한 쿠로시오의 지류는 150m의 등수심선을 따라서 고오도열도 서쪽에서 우회하여 남하하는 시계방향의 와류를 형성할 가능성을 보여주는 현상이다. 이러한 고오도열도 부근해역에서의 와류현상은 Lie and Cho(1997)의 부이추적결과에서도 나타난다. 만일 이러한 와류가 형성된다면 제주도-고오도열도-대마도를 잇는 삼각해역에는 상당한 고염수들이 자리잡고 있으면서 고오도열도 서쪽의 가장 깊은 수심을 중심으로 시계방향의 등염분선을 나타낼 것이다. Fig. 15는 수심에 대하여 평균한 염분의 수평분포를 나타낸 것이다. 그림에서 200m의 등수심선부근에서 34.55%의 고염분층을 중심으로 34.4%-34.5%의 등염분선은 원을 그리면서 퍼져나가는 형태를 보이고 있다.

서수도를 통과하는 대마난류의 주 공급경로

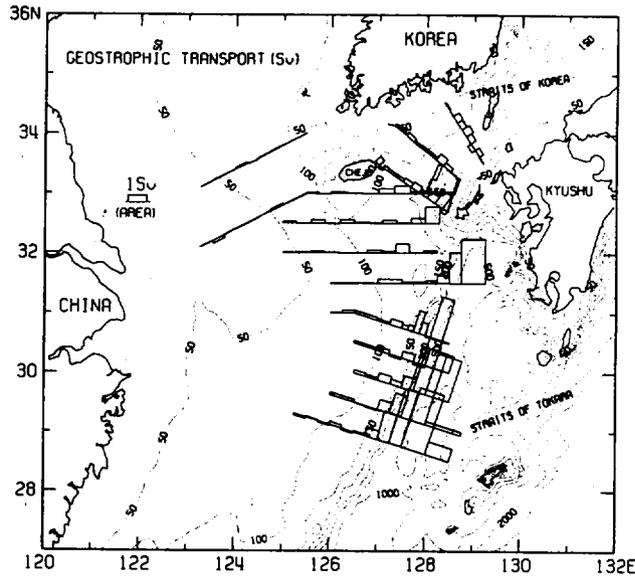


Fig. 14. The volume transports by geostrophic calculations between every pair of the adjacent stations

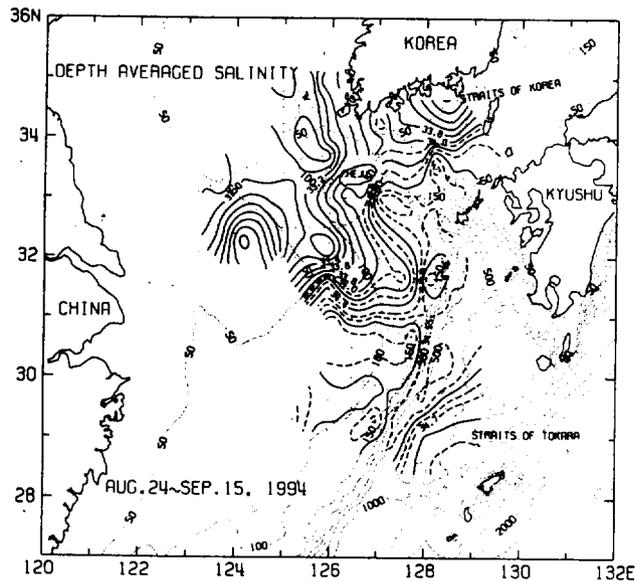


Fig. 15. Horizontal distributions of salinities averaged for the whole depth at each stations in the East China Sea in summer

T-S 곡선의 형태를 분석한 수괴구분에서 대한해협을 통과하는 해수는 표층은 고온저염수 저층은 저온고염수가 분포하는 혼합수형으로 나타났고 이 혼합수형은 제주도 주변해역으로부터 연결되는 것으로 나타났다. 혼합비율분석에서는 대한해협을 통과하는 난류수는 (KSW+KMW)

로 나타났고 이 혼합수형은 제주도 주변해역으로부터 연결되는 것으로 나타났다. 혼합비율분석에서는 대한해협을 통과하는 난류수는 (KSW+KMW)

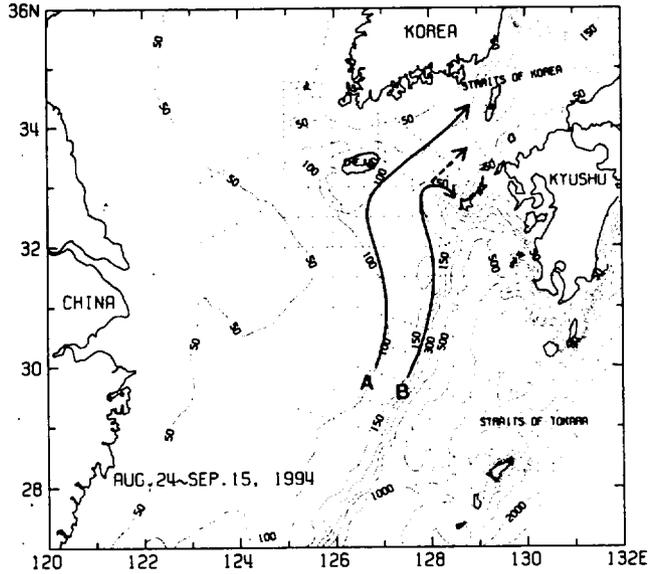


Fig. 16. Schematic representation of another possible route of the Tsushima Current

의 혼합비율이 50-85%로서 이 정도의 혼합비율을 갖는 해수는 동중국해 동부해역의 대륙붕 전역에 분포하고 있다. 지형류 계산에 의하면 큐슈 서쪽에서 분지하는 쿠로시오의 지류가 나타나지만 고오또열도 근방에서 우회하여 남하하는 시계방향의 와류의 형태를 보인다. 이러한 결과로 볼 때 대한해협 서수도를 통과하는 대마난류의 주 공급경로는 동중국해의 100m내외의 등수심선을 따라 제주도 주변해역을 거쳐 대한해협 서수도로 이어지는 등수심선을 따르는 경로인 것으로 보인다. 대륙붕단이 존재하는 150-200m의 등수심선을 따라 북상하는 쿠로시오의 지류는 고오또열도 서쪽에서 우회하여 다시 등수심선을 따라 남하하는 형태를 보이며 이러한 와류 때문에 제주도-고오또열도-대마도를 잇는 삼각해역에는 상당한 고염수들이 자리잡고 있으면서 주변해역으로 퍼져나가는 형태를 띤다.

결론 및 고찰

고염핵에 대한 추적결과 쿠로시오의 지류는 큐슈서쪽에서 분지하여 북상하는 것으로 나타나고

있다. 그렇다면 이 쿠로시오의 지류를 “대마난류”라고 보아도 타당한가? 그 대답은 대한해협 서수도를 통과하는 대마난류수가 주로 이 쿠로시오의 지류로부터 공급되는지 혹은 다른 경로를 통해 주로 공급되는지 확인될 때 분명해질 것이다. 이 논문에서는 대한해협 서수도를 통과하는 대마난류의 주공급 경로를 파악함으로써 대마난류의 분지에 관한 문제를 해결하기 위해 여름철 동중국해의 수온염분자료에 대한 수괴분석을 통해 접근하였다.

T-S 형태에 따르면 여름철 동중국해의 수괴는 크게 “내해수형”, “혼합수형”, “난류수형”, “쿠로시오수형”으로 분류할 수 있었다. 이 중에서 대한해협 서수도를 통과하는 해수는 “혼합수형”으로서 “난류수형”과 “내해수형”이 만나 복잡한 형태를 보이는데 주로 제주도 주변해역으로부터 연결되고 있었다. 혼합수의 혼합비율을 구하기 위해 4 근원수괴의 거리를 계산하는 방법으로 혼합비율을 계산한 결과 대한해협 서수도를 통과하는 대마난류수는 (KSW+KMW)의 혼합비율이 50-85%로서 이 정도의 혼합비율을 갖는 해수는 동중국해 동부해역의 대륙붕 전반에 분포하고 있었다. 지형류 수송량계산에 따르면 큐슈서쪽에서 쿠

로시오로부터 분지하는 쿠로시오의 지류는 고오또서쪽에서 우회하여 남하하는 시계방향의 와류를 형성하는 것으로 보여 제주도-고오또열도-대마도를 잇는 삼각해역에 상당한 고염분해수가 자리잡게 하는 원인을 제공하는 것으로 보인다. 그리고 이러한 고염수는 주변해역으로 퍼져나가지만 대한해협을 서수도로는 직접 연결되지 않고 오히려 34.0-34.55%의 해수가 100m내외의 등수심선을 따라 대한해협의 서수도로 연결되고 있다. 이러한 결과로 판단해 볼 때 대한해협의 서수도를 통과하는 대마난류수의 주 공급경로는 동중국해의 100m내외의 등수심선을 따라 북상하는 경로로 보는 것이 타당할 것으로 보인다. Fig. 16은 대마난류의 북상경로를 단순모식으로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 A경로는 Fig. 1의 a선과 일치한다고 볼 수 있으며 B경로는 고오또열도 서쪽의 150m 등수심선을 따라 우회하는 흐름이 될 것으로 보인다. 따라서 대마난류는 동중국해의 대략 100-150m의 모든 등수심선을 따라 북상하여 제주도 주변해역을 거쳐 대한해협을 통과하는 해류로 정의할 수 있을 것으로 보인다.

하지만 이러한 결과는 부이추적이나 고염핵의 연결 등에 의한 큐슈서쪽에서의 대마난류의 분지를 정면으로 부정할 수 있는 결과는 아니며 앞으로 대마난류의 분지에 관한 문제를 겨울철의 해수특성자료를 포함시켜 두 계절을 비교하면서 보다 정밀한 수괴분석을 통해 접근할 필요가 있다.

요 약

대마난류의 분지에 관한 문제를 해결하기 위해 여름철에 동중국해에서 관측된 수온염분자료를 가지고 수괴분석을 통해 접근하였다. 고염핵에 대한 추적결과 큐슈서쪽에서 고염수가 분지하는 것으로 나타나는데 이 쿠로시오의 지류가 대한해협의 서수도로 직접 연결되는지 수괴분석을 통해 확인하여 보았다. 수괴분석결과 대한해협의 서수도를 통과하는 해수는 여름철 최고염분이 34.0-34.55%인 해수가 통과하는데 이 해수는 표층은 고온저염, 저층은 저온고염의 혼합수형태의 T-S 곡선을 나타내는 것으로 보인다. 해수의 혼합비율

을 계산해본 결과 대한해협을 통과하는 난류수는 KSW+KMW의 혼합비율이 50-85%이며 이러한 비율을 갖는 해수는 동중국해의 대륙붕 전반에 걸쳐 분포하고 있다. 지형류제산에 의하면 큐슈서쪽에서 분지하는 쿠로시오의 지류는 고오또열도 서쪽에서 등수심선을 따라 우회하여 남하하는 와류형태를 나타내며 제주도-고오또열도-대마도를 잇는 삼각해역에 자리잡고 있는 고염수는 와류의 영향인 것으로 보인다. 이러한 결과로 볼 때 대한해협의 서수도를 통과하는 대마난류수의 주공급경로는 동중국해의 100m내외의 등수심선을 따라 제주도 주변을 거쳐 북상하는 경로로 보인다.

사 사

이 연구는 교육부 해양/수산과학분야 학술연구조성비의 지원에 의해 수행되었다(과제번호 KIOS-97-M-OIS, KIOS-96-M-05).

참 고 문 헌

- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu and G.A. Cannon. 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 4, 57-76
- Hsueh Y., H.J. Lie and H. Ichikawa. 1996. On the Branching of the Kuroshio west of Kyushu. *J. Geophys. Res.*, 101, 3851-3857
- Hyun K.H., 1996. Seasonal circulation of the South and West Seas of Korea and the inflow of warm waters into the West Sea in summer. M.S. thesis. Cheju National University. (in Korean with English abstract)
- Ichiye T. 1984. Some problems of circulation and hydrography of the Japan Sea and Tsushima Current. In : *Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, T. Ichiye, editor, Elsevier, New York, 15-54
- Kondo, M., 1985. *Oceanographic investigations of*

- fishery grounds in the East China Sea I. Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50m and near the bottom. Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab., 62, 19-66
- Kim, K., H.K. Rho and S.H. Lee. 1991. Water Masses and Circulation around Cheju-Do in Summer. J. Kor. Soc. Oceanogr., 26(3), 262-277
- Lee J.H., 1995. Water masses and their mixing in the eastern East China Sea-Ocean Circulation and Material Flux of the East China Sea. KORDI Report, 131-170. (in Korean)
- Lie, H.J. and C.H. Cho. 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. J. Geophys. Res., 99, 25081-25091
- Lie, H.J. and C.H. Cho. 1997. Surface Current Fields in the Eastern East China Sea. J. Kor. Soc. Oceanogr., 32(1), 1-7
- Minato, S. and R. Kimura. 1980. Volume transport of the western boundary current penetrating into a marginal sea. J. Oceanogr. Soc. of Japan, 36, 185-195
- Nitani H. 1972. Beginning of Kuroshio (in Kuroshio). Univ. of Tokyo Press, pp. 129-163
- Pang I.C., T.H. Kim, T. Matsuno and H.K. Rho. 1993. On the Origin of the Tsushima Current(1): Barotropic Case. Bull. Korean Fish. Soc., 27(6), 580-593
- Pang I.C. and I.S. Oh. 1995. Warm Water Circulation and its Origin by Sea Level Fluctuation and Bottom Topography. Bull. Kor. Fish. Soc., 28(5), 677-697
- Sawara T. and Y. Hanzawa. 1979. Distribution of Water type in the East China Sea. Umi to Sora, 54(4), 135-148.(in Japanese with English abstract)
- Shin H.R., 1994. Analysis of Seasonal Distribution of Water Mass in the Korea Strait and the East China Sea. J. Kor. Ear. Sci. Soc., 15(2), 81-90. (in Korean with English abstract)