

동중국해의 해수순환과 대한해협 유량의 계절변화

오경희 · 방익찬 · 노홍길*

제주대학교 해양학과 · *제주대학교 어업학과

Circulations in the East China Sea and seasonal variations of volume transport in the Korea Strait

Kyung-Hee Oh · 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*

To study on the relation between the circulations in the East China Sea(ECS) and seasonal variations of volume transport through the Korea Strait, CSK data (1965-1989) are analyzed. As a result, the increase of volume transport in the Korea Strait in summer seems to be due to the seasonal variations of the water mass distributions in ECS. Kuroshio waters out of the shelf break has little seasonal variations. As outflowing to the south sea of Kyusyu, it has little influence on the Korea Strait. Tsushima Warm Water(TWW) flowing along the shelf break to the Korea Strait has no significant seasonal variations. But, the surface waters in ECS show clear seasonal variations : high-temperature and low-salinity in summer and low temperature and high salinity in winter. ECS deep waters have much smaller seasonal variations than the surface waters. Thus, seasonal variations of ECS could be mainly due to the surface waters. The distributions of surface waters in summer coincide with the area of Yangzee coastal waters from Yangzee river to the Korea Strait. It means that the seasonal variation of volume transport in the Korea Strait could be caused by the input of Yangzee coastal waters.

Key words : seasonal variation, volume transport, East China Sea, Yangzee coastal water.

서 론

동중국해 해수순환은 크게 대마난류수의 순환과 황해순환으로 나눌 수 있으며 대마난류수의 순환이 동중국해의 주된 순환(1차순환)을 이루는데 반해, 황해순환은 약하며 계절에 따른 변화(2차순환)를 보이는 것으로 보고되었다(방·김, 1990; Pang, et al., 1992, 1996). 이 보고에 의하면 동중국해의 고온고염의 해수분포는 계절변화에 의해 겨울철에는 황해방면으로 확장되고, 여름철에는 동중국해 방면으로 축소된다. 한편, 대한해협에서는 겨울철에는 대한해협을 통과하는 대마난류수의 유량이 감소하는 반면에 여름철에는 대마난류수의

유량이 증가하고 있다. 만약 이 두현상이 서로 연관이 있다면 우리는 대한해협을 통과하는 대마난류수의 유량이 고온고염수의 분포가 축소되는 여름철에 증가할 수 밖에 없다는 생각을 할 수 있다. 또한 여름철에 급증하는 강우와 황해를 둘러싸고 있는 크고 작은 강들에서 유출되는 강수, 특히 양자강연안수의 유입등도 대한해협 유량의 증가원인이 될 수 있다.

지금까지는 대한해협을 통과하는 대마난류수의 유량변화를 쿠로시오해류의 변화에서 찾으려고 했기 때문에 동중국해에서 대마난류수 분포의 계절변화나 동중국해로 유입되는 강우·강수의 영향들은 대한해협에서 발생하는 유량 변화의 문제에 있

어서 그리 중요하게 받아 들여지지 않았다. 그러나 묵시적으로 받아들여지고 있는 것처럼 대한해협에서 대마난류수 유량의 계절변화가 쿠로시오해류의 변화에 의한 것이라면 크게 두가지의 문제가 나타나게 된다. 첫째, 대한해협의 유량변화는 정확하게 계절변화를 하는 데 비해 쿠로시오해류의 계절변화는 그리 뚜렷하지 않다는 것이다(Nitani, 1972). 둘째, 대한해협에서 대마난류수의 유량은 겨울철

보다 여름철에 대략 두 배의 증가율을 보이는데 (Yi, 1966 Lim and An, 1985) 이러한 변화를 위해서는 쿠로시오해류 또한 여름철에 두 배의 유량변화를 가져야 한다는 것이다(Pang, 1993). 그러나 그렇게 큰 변화는 기대하기 어렵다. 이와같은 문제는 대한해협의 유량변화가 쿠로시오해류에 기인한다는 가정에서 야기된 것인데, 아직까지는 이를 대처할 만한 대안이 제기되지 않았었다.

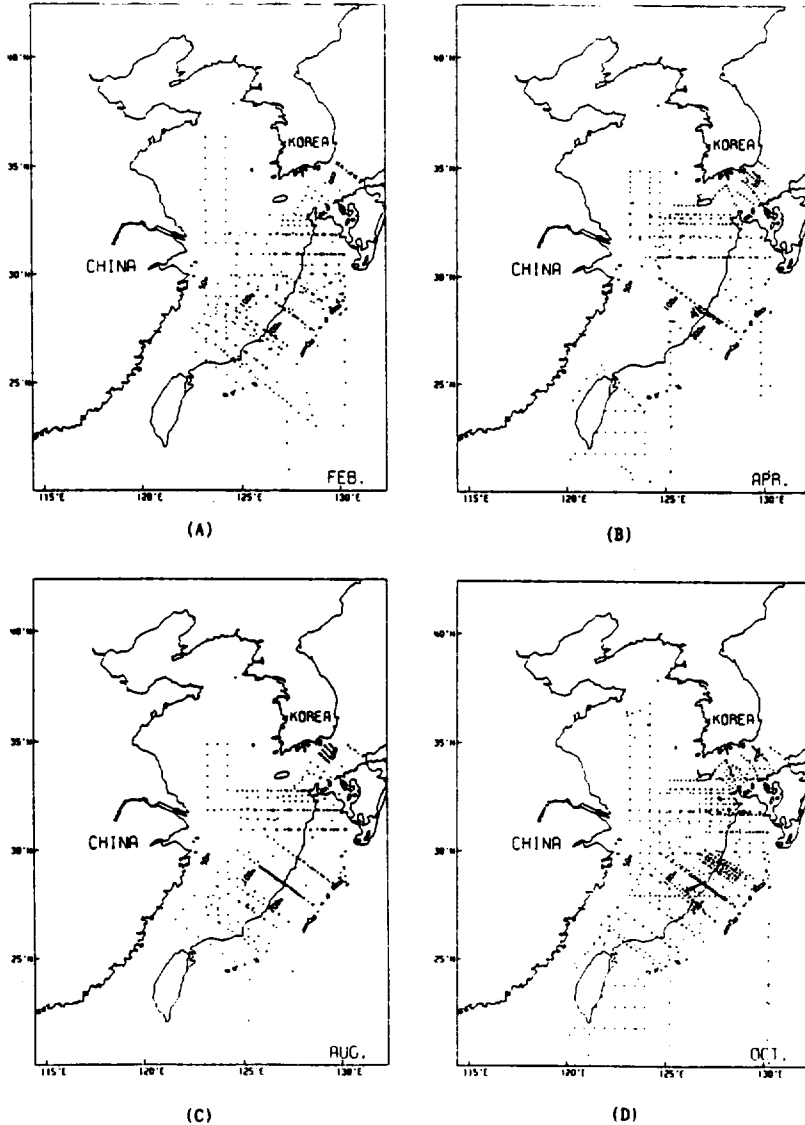


Fig. 1. Stations of the Cooperative Study of the Kuroshio and Adjacent Regions(CSK in(A) FEB., (B) APR., (C) AUG., and (D) OCT., during 1965~1989. (depth in meters)

이 논문에서는 대한해협에서 유량변화를 일으키는 요인을 찾아보기 위해 동중국해 해수분포의 계절변화와 그에 따른 동중국해 해수순환의 계절변화를 알아보았으며, 이들과 대한해협 유량변화와의 관계를 알아보았다. 사용된 자료는 1965년부터 1989년까지의 CSK자료이다. 장기간에 걸쳐 관측된 자료이지만, 관측점이 일정치 않고 자료의 수집시기 또한 불규칙해 분석에 있어서 연결성을 갖지 못하는 아쉬움이 있다. 여기서는 관측일은 일정하지 않지만 관측점의 위치가 비슷한 달만을 정선해서 분석했다. Fig. 1은 관측점들을 나타낸 것으로 약간씩 차이는 있지만 전반적으로 유사한 분포를 보이고 있다. 분석이 이루어진 달은 2, 4, 8, 10월이다.

분석 및 결과

— 해수특성의 계절변화

Fig. 2는 동중국해 해수특성을 나타낸 T-S diagrams로 계절에 따른 해수특성 변화를 보여주고 있다. 분석의 편의상 30°C 이상의 수온값은 제외시켰다. 그러나 그 수는 많지 않다. 유사한 모습을 보이고 있는 2월과 4월의 해수특성분포는 크게 고염의 쿠로시오해수와 동중국해수로 구분되며, 동중국해수는 쿠로시오 중층수와 연결되고 있다. 이것은 쿠로시오의 표층수가 동중국해로 유입되지 않고 있음을 보여주고 있다.

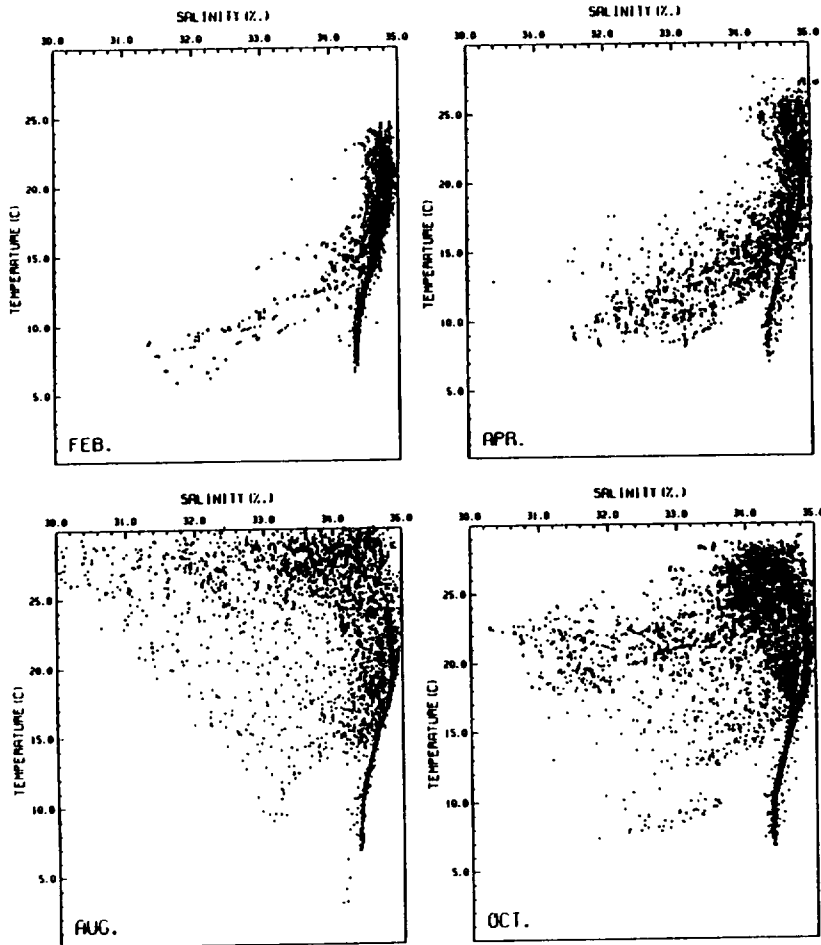


Fig.2. T-S diagrams of the Yellow and the East China Sea in FEB., APR., AUG., and OCT., during 1965~1989.

동중국해수는 2월에 혼합으로 인해 표층수와 저층수가 거의 같은 특성을 보이는 반면에 전반적으로 수온상승을 보이는 4월부터는 표층수가 점점 고온화되고 있다. 표층수의 고온화는 여름에 접어들면서 최고조에 달하게 되는데, 8월분포에서는 현저하게 발달된 고온저염의 표층수를 볼 수 있다. 황해저층냉수의 분포도 볼 수 있는데 겨울철의 황해냉수(5~10℃)보다는 약간 높은 수온값(8~13℃)을 보인다. 10월분포에서도 여전히 발달된 표층수를 볼 수 있지만 8월보다는 낮은 수온값을 보인다. 쿠로시오 표층수가 겨울철에 비해 많은 분포를 보이는 것은 쿠로시오 해역에 집중된 관측에 의한

결과이다.

전반적으로 표층수가 계절에 따른 변화를 보이는 반면에 저층수는 큰 변화를 보이지 않는다. 이러한 동중국해 해수특성의 계절변화는 Fig.3에서 쉽게 볼 수 있다. Fig.3은 1℃, 0.2‰의 단위격자내에 들어가는 자료를 모아 그 빈도수를 연결해서 나타낸 T-S diagrams로 (by Cochrane, 1956) 여름철에 고온저염의 빈도수가 압도적으로 나타나면서 표층수가 뚜렷한 계절변화를 보이는 데 비해 저층수의 변화는 표층에 비해 매우 작아 동중국해 해수특성의 계절변화는 동중국해 표층수에서 주로 발생함을 알 수 있다.

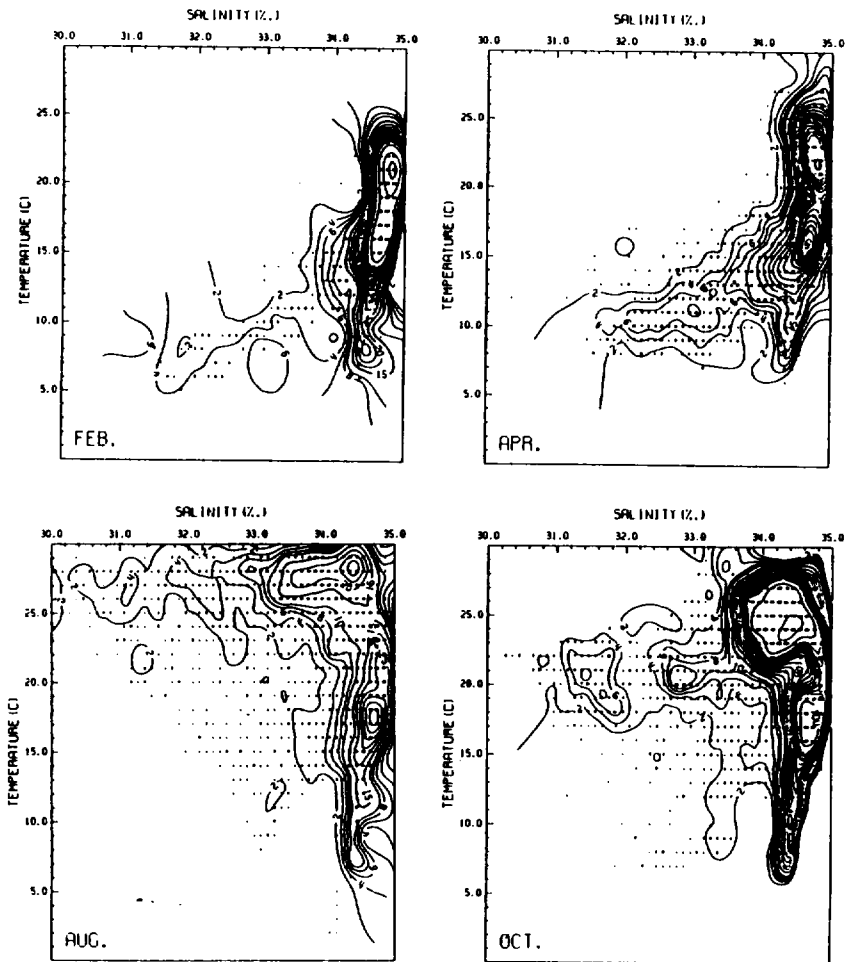


Fig. 3. Frequency T-S diagrams of the Yellow and the East China Sea in FEB., APR., AUG. and OCT., during 1965~1989. which show the number of data plotted in square of 1℃ and 0.2‰.

－ 해수특성의 공간분포

Fig. 4의 격자망은 동중국해 해역을 위도와 경도 각 1°를 경계로 구분한 것으로, 각각의 격자를 왼쪽 아랫부분에 그려진 것과 같이 경도축은 수온, 위도축은 염분인 T-S diagram으로 이용하였다. Fig. 5(A)~(D)는 Fig. 4에 제시된 격자망 부분을 확대한 것으로 해수특성의 해역변화를 보이고 있다.

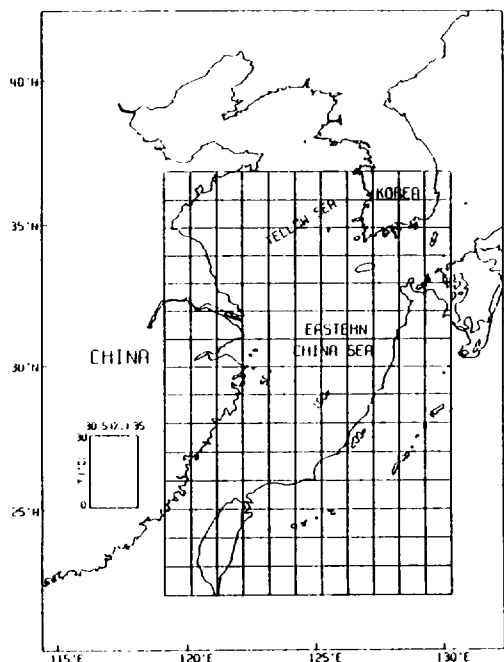


Fig. 4. Squares of 1 degrees of latitude and longitude in the Yellow and the East China Seas, being used for T-S diagram. X and Y axes of the squares represent salinity(30~35‰) and temperature(0~30°C). Depth in meters.

2월(Fig. 5(A))에는 황해방면으로 갈수록 저온저염수들이 분포하는 반면에 쿠로시오 해역으로 갈수록 고온고염수들이 분포하고 있으며, 표층수와 저층수의 구분은 뚜렷하지 않다. 8월(Fig. 5(C))에는 2월과 달리 표층수의 고온화가 현저하게 나타나고 있다. 전 해역에 걸쳐 해수가 고온화되어 있지만 황해방면에는 저층에 냉수가 유지되고 있어 고온저염의 표층수와 큰 수온차이(10°C이

상)를 보인다. 이런 특징은 제주도 주변은 물론 대한해협에서도 나타나고 있다. 쿠로시오 해역으로 갈수록 고온고염수들이 나타나고 있지만, 대륙붕단을 경계로 쿠로시오해수와는 구분된다. 타이완 부근해역에서부터 시작되는 동중국해수는 대한해협으로 이어지며 대륙붕단을 따라 일정한 모습을 유지하고 있다.

2월과 8월의 분포가 해역별로 다소 규칙적인 모습들을 보이는데 비해 4월(Fig. 5(B))과 10월(Fig. 5(D)) 분포들은 다양한 형태를 보이고 있다. 4월 분포는 동중국해 중심에서 저염수와 고염수의 혼합을 보이고 있는데 이것은 4월에도 저염의 표층수가 나타나며 대륙붕단 근처까지 영향을 주고 있음을 보여준다. 10월에도 표층수의 고온화는 나타나고 있지만 황해방면과 동중국해 중심에 보이는 고온저염수들이 제주도 동쪽해역에서는 나타나지 않고 있어 고온저염의 표층수의 분포범위가 8월보다 작아진 것을 알 수 있다.

저층해수분포가 계절에 따른 변화를 거의 보이지 않는데 비해 표층해수분포는 수온상승과 저염수의 유입에 의해 표층수가 고온저염화되면서 뚜렷한 계절변화를 보인다. 고온저염의 표층수는 양자강입구에서 동중국해를 동으로 가로지른 후 대한해협으로 연결되는 해역 이북에서 주로 분포하는데 이것은 여름철 양자강 입구에서 북동쪽으로 확산되는 양자강연안수의 경로와 일치하고 있음을 알 수 있다. 동중국해 해수특성의 공간분포에서도 계절변화는 황해방면의 표층수에서 주로 발생함을 알 수 있다.

－ 해수분포의 계절변화

Fig. 6(A)~(D)는 각각 2, 4, 8, 10월 표층(0m), 중층(50m), 저층(100m)의 수온과 염분 평균수평 분포도이다. 2월(Fig. 6(A))분포에서 고온고염의 쿠로시오해수는 대륙붕단을 따라 외해에 분포하고 있으며 큐슈남쪽 해역으로 연결되고 있다. Kondo (1985)는 대마난류수가 큐슈남쪽 해역에서 분지된다고 하였으나 이 분포에서는 분지를 확인할 만한 분포는 보이지 않는다. 오히려 대마난류수는 타이완 부근해역에서부터 대륙붕단을 따라 대한해협으로 연결되어 분포하고 있다. 대마난류수의 북서해역에는 저온저염의 황해냉수가 황해에 폭넓게 자리잡고 있다.

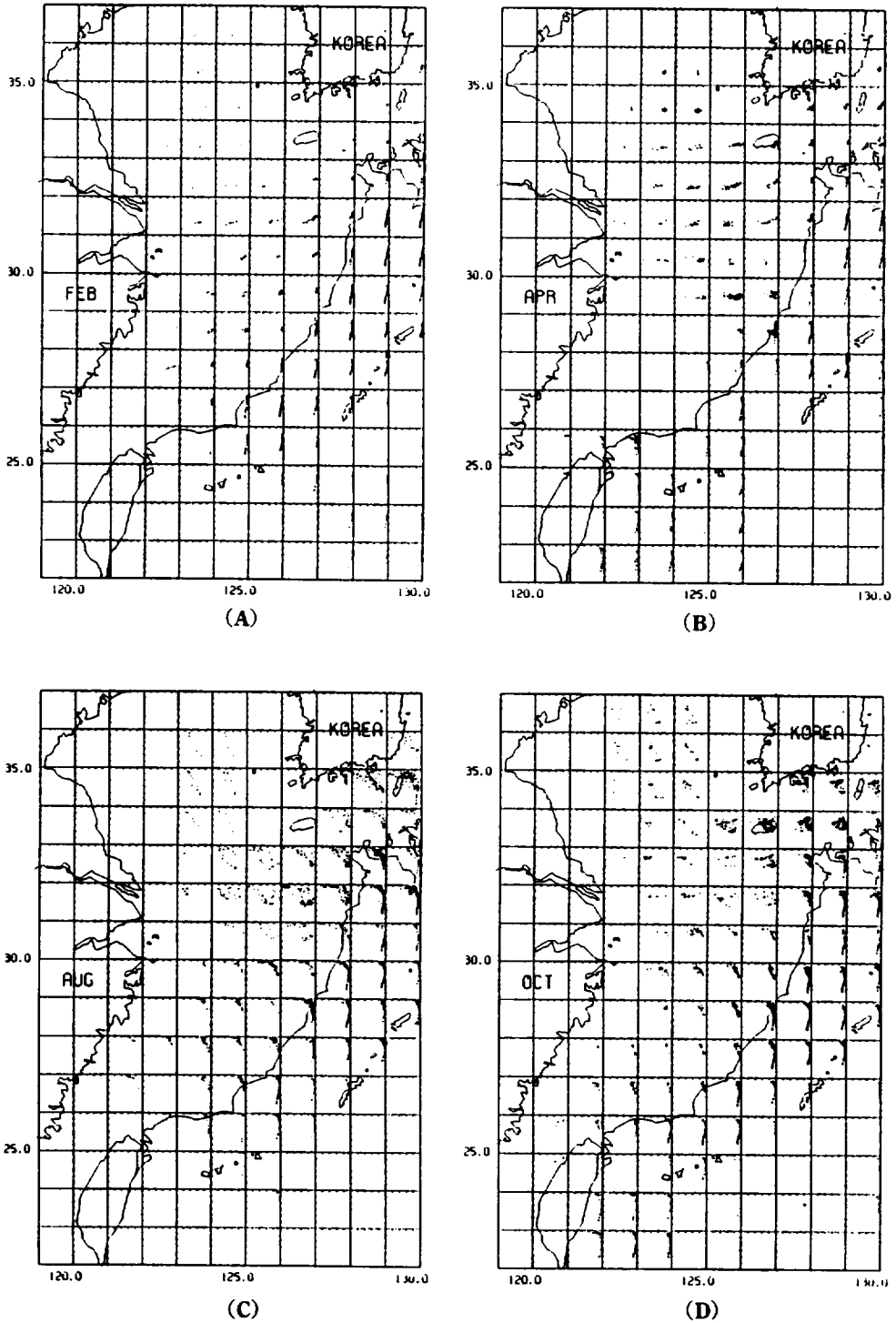


Fig. 5. T-S diagram of the Yellow and the East China Sea in (A) FEB., (B) APR., (C) AUG. and (D) OCT., during 1965-1989.

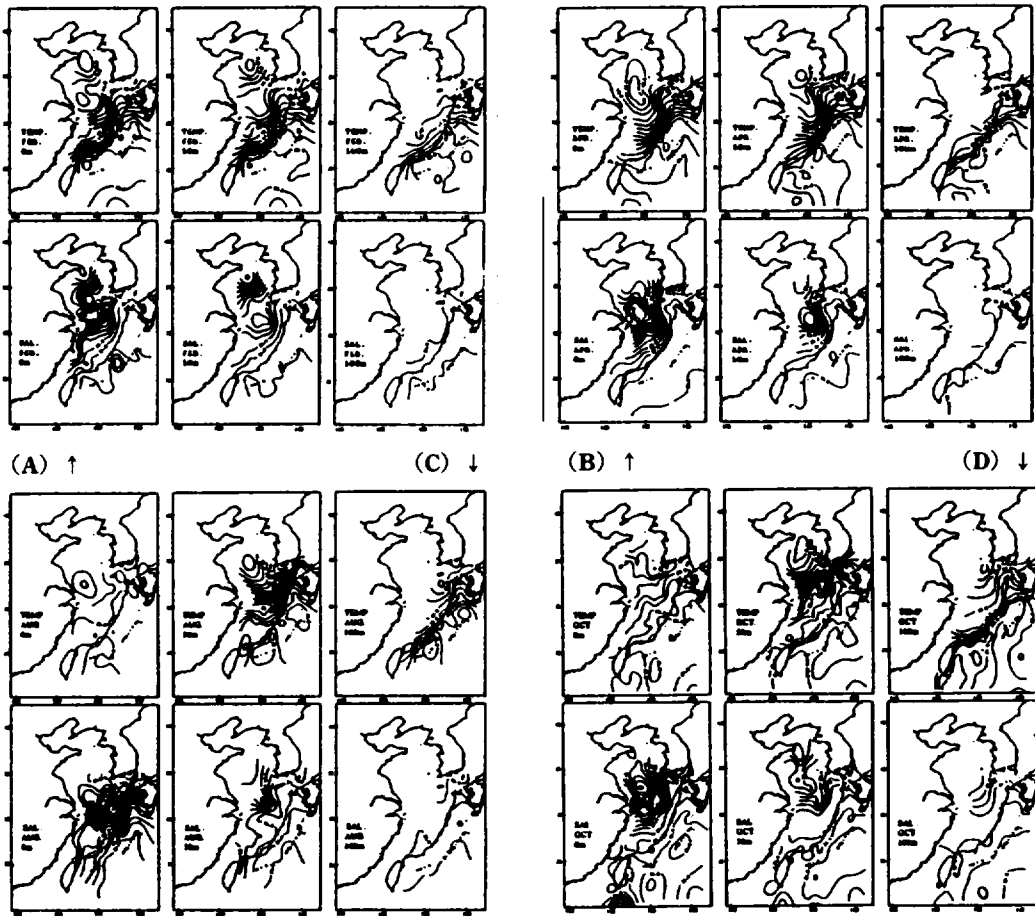


Fig. 6. Horizontal distributions of mean temperatures and salinities in the depths of 0m, 50m, and 100m. in (A) Feb., (B) APR., (C) AUG. and (D) OCT., during 1965~1989.

Fig. 6(B)는 4월분포이다. 2월에 비해 황해냉수가 남쪽으로 치우쳐 분포하고 있으며 이로 인해 대마난류수가 대륙붕단 쪽으로 밀리고 있다. 전체적으로 수온분포는 2월과 비슷하지만 염분분포에서는 표층에 저염수의 분포가 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 양자강 입구에서부터 시작되고 있는 이 저염수는 동중국해 중심까지 분포하고 있는데 이는 양자강으로부터 확산되는 저염수가 4월에도 나타나고 있음을 보여준다.

8월분포(Fig. 6(C))에서는 표층과 중·저층의 구분이 뚜렷하다. 이것은 표층과 중·저층이 다른 구조를 가지고 있으며 두 층간에 수직혼합이 이루어지지 않고 있음을 보여준다. 표층은 동중국해 전해역에 걸쳐 고온저염의 분포를 보이는데 비

해, 중·저층분포에서는 겨울철 황해냉수의 분포 위치와 비슷한 곳에 황해저층냉수가 분포하고 있으며 전반적인 중·저층의 해수분포 양상이 겨울철과 크게 다르지 않다. 10월분포(Fig. 6(D))도 8월과 비슷하지만, 중층분포에서는 8월보다 다소 축소된 황해저층냉수의 분포를 보이고 있다.

동중국해 표층해수분포가 계절에 따라 뚜렷한 변화를 보이는데 비해 중·저층의 해수분포는 작은 변화만을 보이고 있다. 이는 여름철에 태양에너지의 증가와 급증하는 강우와 강수로 인해 표층의 해수가 강한 영향을 받으며, 그로 인해 표층과 중·저층사이에 강한 계절약층이 형성되어 표층수와 중·저층수가 분리되기 때문이다. 중·저층의 해수분포가 계절에 따라 크게 변화하지 않는다는

것은 동중국해의 해수순환의 기본적인 구조가 중·저층에서는 계절변화를 하지 않으며 계절변화는 표층에서 이루어지고 있다는 것을 보여준다.

－ 해수순환의 계절변화

Fig. 7은 기준면이 50, 100, 200m일 때의 역학심도편차(dynamic depth anomaly, in dynamic metre) 분포도이다. 수심분포로 인해 200m를 기준한 분포는 쿠로시오해역 만을 보여주며, 수심 100m를 기준한 분포는 대륙붕단 양쪽의 대마해류 축으로

보이는 해역은 포함하지만 보다 안 쪽 해역은 포함하지 못한다. 수심 50m를 기준한 분포는 전 해역을 포함하지만 표층 밖에는 보여주지 못한다. 그러나 전반적으로 이 분포들은 계절변화가 수직으로는 표층에서 수심 100m까지의 상층에서 발생하며, 해역으로는 양자강 외해의 저층 저온수 해역과 대마해류지역 사이에서 주로 발생함을 보여준다. 이러한 변화를 모두 포함시키기 위해 표층에서 해저까지의 역학심도편차 분포(Fig. 8)를 구하여 보았다. 이 분포는 역학심도편차 분포 자체로는 별 의미가 없으나 그들의 계절변화는 보여주고 있다.

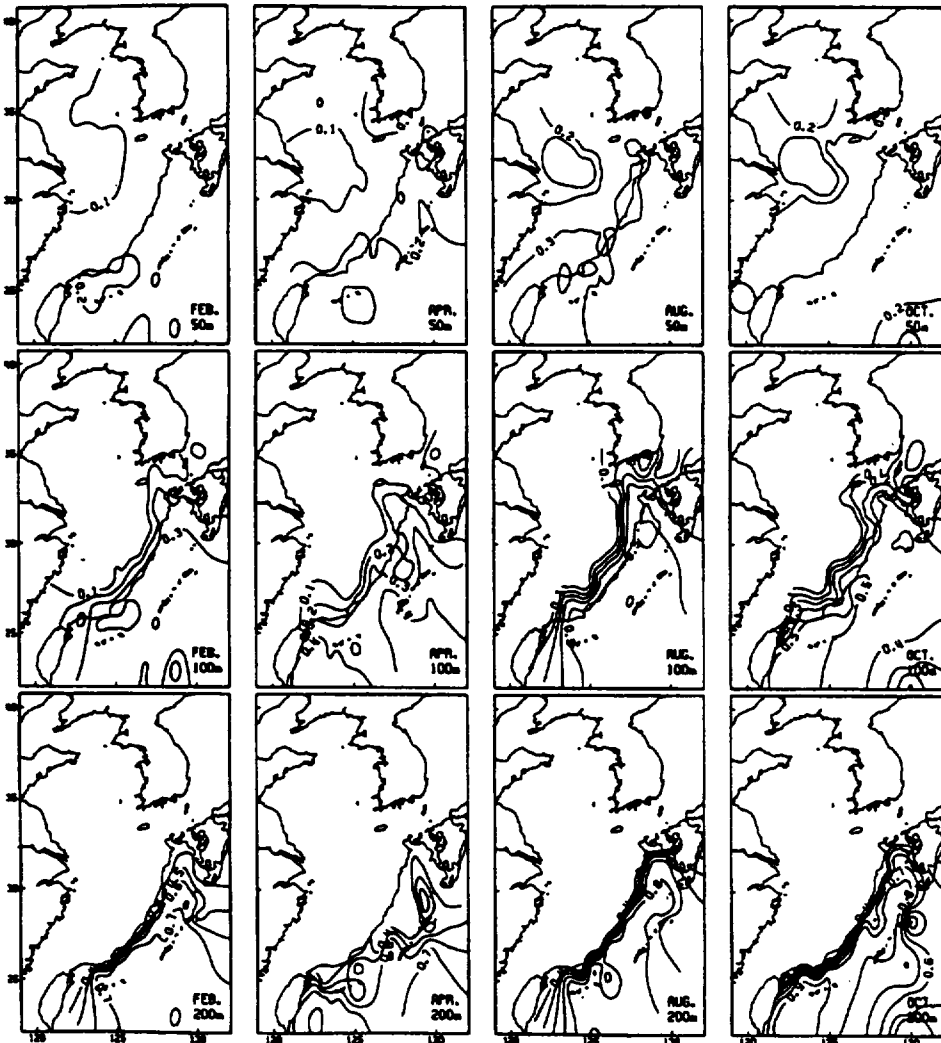


Fig. 7 Dynamic topography of the sea surface relative to the depth of 50, 100, and 200 m in FEB., APR., AUG. and OCT., during 1965~1989. in dynamic metres. (1 dynamic metre = $10m^2/s^2$)

Fig. 8은 수심이 500m 이하일 때는 표층에서 저층까지, 수심이 500m 이상일 때는 표층에서 500m까지의 역학심도편차(dynamic depth anomaly, in dynamic metre)분포도이다. 2월과 4월에 0.3~1.5의 분포범위를 보이는 쿠로시오해수는 8, 10월에 0.5~1.6의 분포범위를 보이고 있어 쿠로시오 유량 변화가 거의 없거나 오히려 겨울보다 여름에 약간 작아짐을 알 수 있다. 이에 비해 대한해협에서는 2, 4월에 0.2~0.3, 8, 10월에 0.3~0.5로 겨울철보다 여름철에 약 2배의 증가를 보인다. 대한해협으로 유출되는 해수를 대마난류수라 한다면 쿠로시오해수와 의 경계값은 겨울에 0.3, 여름에 0.5이며 이 선들은 동중국해 대륙붕단을 따라 대만 북쪽해역으로 연결된다. 이것은 동중국해 대륙붕단 바깥쪽에 분포하는 쿠로시오 해수는 모두 큐슈남쪽으로 유출되며 대마난류수는 이미 타이완 해역에서 동중국해로 북상한 후 대륙붕을 따라 대한해협으로 유출되고 있는 것을 보여준다. 따라서 대한해협의 유량변화는 결국 쿠로시오해류의 변화가 아니라 동중국해의 해류변화에 기인하는 것을 알 수 있으며 이 변화는 양자강연안수가 여름철에 대한해협으로 흘러가는 해역과 거의 일치함을 알 수 있다.

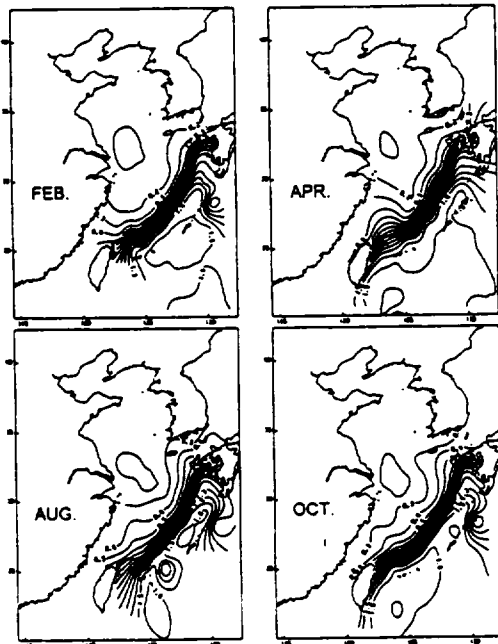


Fig. 8. Dynamic topography of the sea surface relative to the bottom or 500m for greater depth in FEB., APR., AUG. and OCT., during 1965~1989. in dynamic metres. (1 dynamic metre = $10m^2/s^2$)

역학심도편차가 보여주는 이와같은 해수순환은 해수분포에서도 확인할 수 있다. Fig. 6(A)~(D)에 나타난 해수분포는 대륙붕단을 경계로 쿠로시오해수와 대마난류수가 분리되고 있다. 대륙붕단 바깥쪽에 분포하는 해수(쿠로시오)는 대륙붕단을 따르다가 큐슈남쪽해역으로 이어지고 있으며 계절 변화는 거의 없다. 대륙붕단 안쪽에 분포하는 대마난류수는 타이완 부근에서부터 대한해협까지 이어지고 있지만 동중국해 중심에 나타나는 저염수의 분포변화에 따라 대륙붕단 쪽으로 압박을 받고 있으며 계절변화는 대부분 제주以南에서 대한해협을 잇는 해역에서 나타나고 있다. 여름철 동중국해 중심에 분포하는 고온저염의 표층수는 대한해협까지 영향을 주고 있는데 그 분포는 양자강입구에서 북동쪽으로 확산되는 양자강연안수의 경로와 일치한다. Chen(1994)에 의하면 동중국해로 유입되는 강수의 대부분은 양자강연안수이며 여름에 최대의 유량을 보인다. 이것은 겨울보다 여름에 약 두 배의 증가를 보이는 대한해협의 유량변화가 양자강연안수의 계절변화와 밀접한 관계가 있음을 보여 주고 있다.

결 론

대한해협의 유량은 겨울보다 여름에 대략 두 배의 증가율을 보이는데, 일반적으로 받아들여지고 있는 요인은 쿠로시오해류의 변화이다. 그러나 쿠로시오해류가 그리 뚜렷한 계절변화를 보이지 않고, 또 계절변화를 한다고 해도 대한해협 유량의 계절변화를 일으킬 만큼의 유량변화를 기대하기는 어렵다. 따라서 이 논문에서는 동중국해 해수분포의 계절변화와 이에 따른 해수순환을 알아보고 이들과 대한해협의 유량변화와의 관계를 살펴보았다.

동중국해 해수분포의 계절변화에서 쿠로시오해수는 계절변화가 거의 없을 뿐 아니라 동중국해 대륙붕단 바깥쪽에서 큐슈남쪽해역으로 연결되고 있어 대한해협에는 거의 영향을 미치지 않고 있다. 이런 양상은 해수순환의 계절변화에서도 보인다. 타이완 부근해역에서 시작되는 대마난류수의 분포는 쿠로시오 해역에 근접해서 나타나고 있지만 대륙붕단을 경계로 쿠로시오해수와 분리되며 대한해협으로 이어진다. 동중국해의 해수분포는 겨울에는 표층과 저층의 구분이 거의 없지만 여름에는 표층수가 고온저염화되면서 계절변화를 보이는데

쿠로시오 해역보다는 주로 양자강입구에서 동중국해를 동으로 가로지른 후 대한해협으로 연결되는 해역이북에서 일어나고 있다.

고온저염의 동중국해 표층수의 분포는 여름철에 양자강입구에서 북동쪽으로 확산되어 대한해협까지 영향을 주고 있는 양자강연안수의 흐름과 거의 일치해서 나타나고 있는데 이런 사실들은 대한해협 유량의 계절변화가 쿠로시오해수나 대마난류수의 계절변화에 의해 일어난다기 보다는 동중국해 표층수의 계절변화, 특히 양자강연안수에 의해 일어나고 있음을 보여준다.

요 약

CSK 자료(1965~1989)분석을 통해 동중국해 해수분포의 계절변화에 의한 동중국해 해수순환과 대한해협 유량의 계절변화를 알아보았다. 분석결과 대한해협에서 겨울보다 여름에 증가하는 유량의 계절변화는 동중국해 해수분포의 계절변화에 의한 것으로 생각된다. 대륙붕단 바깥쪽에 위치하는 쿠로시오해수는 계절에 따른 변화가 거의 없을 뿐 아니라 큐슈남쪽 해역으로 유출되면서 대한해협에는 영향을 주지 않는다. 또한, 대륙붕단을 따라 대한해협으로 이어지는 대마난류수의 계절변화도 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이에 반해 여름철 수온상승과 저염수의 유입 증가에 의한 고온저염의 동중국해 표층수는 겨울철 저온고염의 동중국해 표층수와 뚜렷한 구분을 보이면서 계절변화를 한다. 동중국해 저층수는 계절에 따라 작은 변화만을 보임으로서 동중국해 해수분포의 계절변화는 주로 표층수의 계절변화에 의한 것임을 보여준다. 여름철 동중국해 표층수의 분포는 양자강입구에서 대한해협까지 이어지는 양자강연안수의 경로와 일치하여 대한해협 유량의 계절변화는 양자강연안수에 의해 주도되는 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 1996-1998 교육부 학술연구조성비(해양수산분야)와 1996-1998 한국과학재단 핵심전문연구비(961-0404-015-2)로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 방익찬, 김태희, 1989. 동지나해 해수분포의 계절변화와 해수순환. 제주대학교 논문집, 28, 61 ~ 73.
- 방익찬, 김태희, 1990. 황해와 동지나해 해수순환에 대한 바람의 영향. 제주대학교 논문집, 31, 49 ~ 61.
- Chen C., R. C. Beardsley, R. Limeburner and K. Kim, 1994. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow and East China Sea and adjacent Kuroshio during 1986. Cont. Res. Vol. 14, 7/8, 909~929.
- Cochrane J. D., 1956. The frequency distribution of surface water characteristics in the Pacific Ocean. Deep-Sea Res., 4(1), p.296~298.
- 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.
- Lim. C. H. and H. S. An, 1985. The comparison of the volume transport in the Korea Strait and in the middle of the East Sea(Japan Sea). J. Oceanogr. Soc. Korea, 20, 50 ~ 55.
- Nitani H., 1972. Beginning of the Kuroshio : KUROSHIO. Stommel, H. and K. Yoshida, editor, Univ. Tokyo Press, Japan, 129~163.
- 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 and J. H. Lee, 1996. Water mass distributions and seasonal circulation north-west of Cheju Islands in 1994, Bull. Korean Fish. Soc., 29(6), in print.
- Pang I. C., T. H. Kim, T. Matsuno, H. K. Rho, 1993. On the Origin of Tsushima Current(I) : Barotropic Case. Bull. Korean Fish. Soc. 26(6), 580~593.
- Yi S. U., 1966. Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait. J. Oceanogr. Soc. Korea, 12, 7~13.