

황해와 동지나해 해수 순환에 대한 바람의 영향***

방익찬*, 김태희**

Effects of winds on the circulations in the Yellow and East China Seas***

Pang Ig-chan*, Kim Tae-hee**

Summary

In the East China Sea, the distributions of Kuroshio system waters are extended in the north-west direction in winter, to the entrance of the Yellow Sea, and withdrawn in the south-east direction in summer, to the south and east seas of Cheju Island. This seasonal variations seem to be related with the seasonal variations of Tsushima water transport in the Korea strait. The analyses on the seasonal salinity variations in the north-west seas of Cheju Island show the necessity of water flows to and from the Yellow Sea.* This could give a clue to the present arguments of the existence of Yellow Sea Warm Current in winter and also of the south-extension of Yellow Sea Bottom Cold Water in summer. As upwind flows driven by seasonal wind, the water flows to and from the Yellow Sea drive another circulation in the East China Sea and thus result in the seasonal variations of water distributions.

1. 서론

동지나해와 제주도 주변을 흐르는 해수는 고온 고염의 Kuroshio계 해수와 이에 대비되는 저온저염의 해수들로 크게 구분할 수가 있으며 본 연구에서는 고염의 쿠로시오계 해수를 제외한 모든 저염의 해수를 편위상 연안수라고 표현하였다. 동지나해에서 쿠로시오계 해수의 분포는 겨울철에 북

서쪽으로 확장되고, 여름철에 남동쪽으로 후퇴하는 계절변화를 하는 것으로 보고되었는데(방과 김, 1989) 이러한 해수분포의 계절변화는 황해와 동지나해의 해수순환을 파악하는 데 매우 중요한 실마리를 제공해 준다.

황해와 동지나해에는 각각 독립된 역학에 의해 발생하는 두 개의 해수순환이 있는 것으로 보인다. 하나는 쿠로시오계 해수의 흐름에 의해 유도되는 1차적인 강한 해수순환이며 통상적으로 이해되고

* 해양과학대학 해양학과, ** 해양과학대학 해양학과(대학원)

*** 이 논문은 1989-1991 한국과학재단 신진연구비에 의하여 연구되었음.

있는 대마해류의 해수순환이다. 이 해수순환은 계절에 따라 변화를 보이는데 그 변화는 자체의 원인에 의해서가 아니라 다른 해수순환의 영향에 의한 것으로 보인다. 황해와 동지나해에서 대마해류의 흐름을 계절변화시키는 다른 해수순환은 그것이 발생하는 시간의 길이로 보아 대마해류의 흐름과 같은 강한 해수순환은 아니며 그에 비해 매우 완만한 2차적인 해수순환이다. 이와같이 완만한 해수순환이 황해와 동지나해 해수순환의 규명에 중요한 이유는 이 2차적인 해수순환이 황해와 동지나해에서 아직 밝혀지지 않고 있는 대마해류의 계절변화나 겨울철 황해난류수의 유입, 여름철 황해저층냉수의 남하, 여름철 양자강연안수의 유입과 같은 현상을 발생시키는 원인이라 생각되기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 2차적인 해수순환과 그 역학을 파악하여 동지나해의 해수순환을 밝혀보고자 한다.

황해와 동지나해에서 계절변화를 일으킬 수 있는 요인으로는 크게 쿠로시오의 변화, 해수표면을 통한 계절영향, 계절풍으로 생각할 수 있다. 이중 쿠로시오의 변화는 규칙적인 계절변화가 뚜렷이 나타나지 않기 때문에(Nitani, 1972) 동지나해의 계절변화의 요인으로 보기는 힘들며, 해수표면을 통한 계절영향 또한 동지나해에서 표층의 영향이 미약한 50m층의 계절변화를 설명하기 어려워 역시 계절변화의 요인으로 보기 어렵다. 현재로는 계절풍이 동지나해에서 해수분포의 계절변화를 일으킬 수 있는 유일한 요인으로 보인다. 그러나 동지나해와 같은 해역은 그 규모로 보아 Ekman transport의 영향이 집중되지 않는 외해(open sea)이기 때문에 계절풍에 의한 Ekman Transport로 단순하게 동지나해의 해수분포가 변화하지는 않을 것이다. 바람의 영향이 나타나기 위해서는 Ekman transport의 영향이 효과적으로 나타날 수 있는 해역이 필요하며 황해가 이러한 해역이다. 황해의 해저지형의 특징인 양륙봉(Double-shelf)이 바람의 효과가 나타나기 좋기 때문인데 그 이유는 Ekman Transport가 양쪽 해안에 영향을 주어 대륙붕 상에 여러 종류의 파를 발생시키며 이 파들이 바람의 효과를 전달하기 때문이다. 바람의 변화는 이 해역에서 대개 1일 이

상의 주기를 가져 그 바람의 효과도 장주기의 파로 전달된다. 해수면의 변화는 Kelvin Wave에 의해, 유속의 변화는 Continental Shelf Wave에 의해 주로 결정된다(Pang 1987, Hsueh and Pang, 1989). Kelvin Wave에 의해 결정된 해수면은 중요한 압력경도력을 발생시키며 황해의 골을 따라 역풍류(upwind flow)를 발생시킨다. 이 효과는 물론 다른 방향으로도 해석될 수 있으며(Park, 1986), 해류관측 결과와(Hsueh and Romea, 1983) 실제 바람을 사용한 Wave Model에서도 나타난다(Pang 1987, Hsueh and Pang 1989). 황해에서 역풍류의 형태로 나타나는 흐름은 황해 해수순환의 중요한 요인이며 제주도 주변해역과 더 나아가 동지나해의 해수분포를 변화시킬 것이다. 실제로 제주도 주변해역 특히 제주도 북서해역에서 해수분포 계절변화가 가장 뚜렷하게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 황해와 동지나해의 2차적인 해수순환의 효과를 분석하기 위하여 우선 제주도 주변해역과 동지나해의 관측자료로 해수분포의 계절변화를 살펴보았다. 그러나 이 해역 전역을 관측한 자료가 없기 때문에 관측날짜는 다르기는 하나 같은 계절의 관측자료를 연결시켜 사용하였다. 비록 이들의 관측날짜가 다르기는 해도 오랜 시간에 걸쳐 나타나는 큰 규모의 변화를 살펴보는 데는 무방할 것이다. 다음에는 이 관측자료에 나타난 동지나해의 해수분포 계절변화와 대한해협에서의 대마난류 유량의 계절변화와의 관계를 살펴보았다. 동지나해에서의 쿠로시오계 해수의 분포는 겨울에 확장되고 여름에 후퇴하는데 반해 대한해협에서 대마난류의 유량은 이와는 반대로 여름에 강해지고 겨울에 약하다(Yi 1966, Ichiye 1984, Miita and Ogawa 1984). 이러한 위상의 차이는 언뜻 모순되는 현상으로 보이기는 하나 실제로는 오히려 두 현상이 서로 관련될 수 있기 때문이다. 다음에 겨울철 황해난류수의 유입과 여름철 황해저층냉수의 남하와 연관되는 황해로의 해수유출입 존재여부를 해수량과 염의 보존을 이용한 Box Model로 확인하였으며 마지막으로 바람에 의한 역풍류와 해수순환을 수치모델로 실험하여 해수순환에 대한 이상의 추론을 확인하였다.

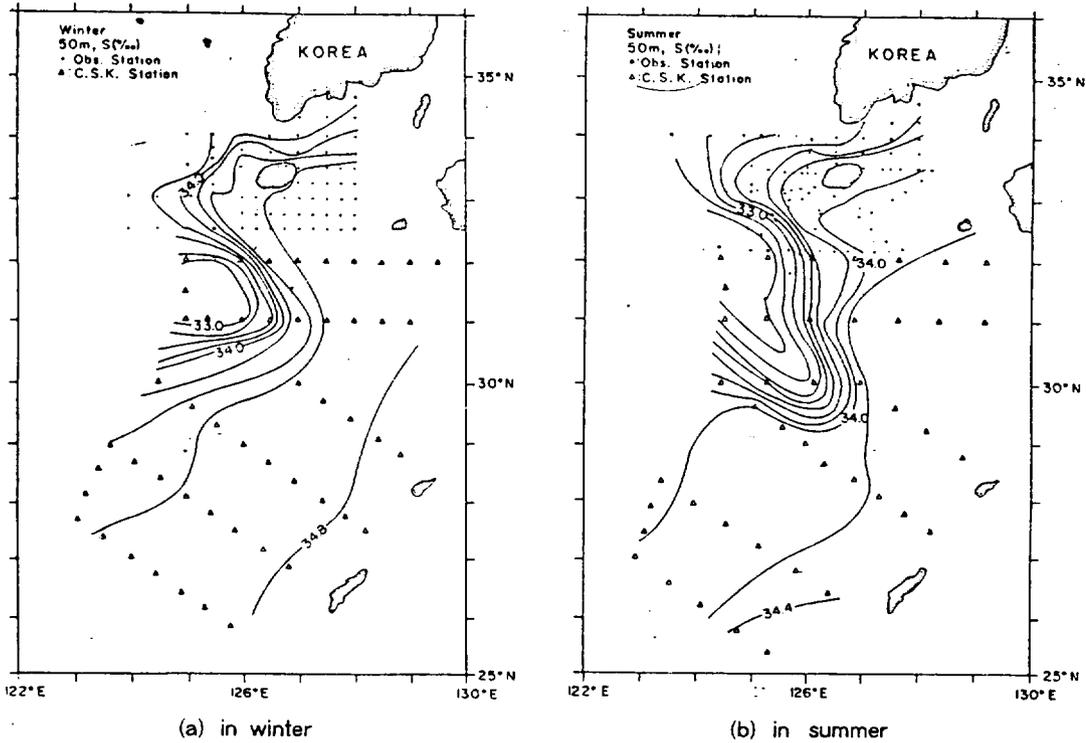


Fig. 1. Salinity distributions on the 50m layer in the East China Sea.

2. 해수분포의 계절 변화와 해수 순환

해수분포의 계절변화를 살펴보기 위해 동지나해역에서 관측된 C.S.K. 자료와 제주대학에서 관측한 제주도 주변해역의 관측자료를 사용하였다. 관측날짜들은 겨울철 C.S.K. 자료가 1971년 1/28-2/11 (No.298), 1972년 1/27-2/16 (No.323), 1973년 1/26-2/11 (No.354), 1974년 1/28-2/28 (No.388), 1976년 2/9-2/21 (No.418) 이며 여름철 C.S.K. 자료가 1971년 7/19-8/13 (No.306), 1972년 7/27-8/14 (No.343), 1974년 7/21-8/14 (No.373), 1975년 7/12-8/12 (No.409), 1977년 7/12-8/13 (No.442) 으로 각각 5년간의 자료다. 제주 주변해역 자료의 관측날짜는 1983년 7월, 1985년 4월, 7월, 1986년 3월, 1988년 4월, 7월, 1989년 4월이다. 여기서 보려는 것은 쿠로시오계 해수와 연안수 분포의 계절변화이므로 일사량이나 강우, 증발량과 같은 해수표면으

로부터의 영향이 크게 미치지 않는 50m 층을 사용하였다. 이 층에서는 동지나해로 북상해 올라오는 쿠로시오계 해수를 년중 34.0‰로 구분하였다. 이 염분값은 이미 연구된 여러 동지나해의 해수특성분포 분석에서도 쿠로시오계 해수의 년중 최저 염분값으로 나타나 동지나해의 50m 층에서 쿠로시오계 해수와 연안수를 구별하는 경계값으로 사용될 수 있다(방과 김, 1989).

Fig.1은 1974년 C.S.K.자료와 정선 관측 자료로 50m층의 염분의 분포를 나타낸 것이다. 동지나해에서 쿠로시오계 해수와 연안수는 대체로 남서-북동 방향을 경계로 분포하고 있으며 이러한 경계역의 분포는 계절에 따라 변하고 있다. 겨울철에 고염의 쿠로시오계 해수는 양자강퇴 부근의 일부를 제외한 관측 전해역에 분포하며 제주도 북서해역의 황해 입구역까지 확장되고 있다. 반면에 여름철에는 쿠로시오계 해수가 제주도 이남이동(以南以東)으로 남하하여 분포하고 있고 동지나해

에서도 남동 방향으로 후퇴하고 있음이 보인다. 이러한 해수분포의 계절변화는 동지나해 해수순환의 변화에 의한 결과로(방과 김, 1989) 대한해협에서의 대마난류의 유량에 영향을 미칠 가능성이 있다. 그 해수순환의 변화는 동지나해에서 대마해류로 표현되는 1차적인 해수순환의 범위가 겨울에 북서방향으로 확장되는데 반해 여름에는 남동방향으로 축소하는 것이며 이 변화가 대한해협에서 대마난류의 유량에 영향을 미치는지의 여부는 동지나해의 해수순환을 밝히는 데 매우 중요하다. 왜냐하면 발생하는 역학이 다른 동지나해의 두 해수순환이 서로 영향을 준다면 지금까지 복잡하게 생각되었던 동지나해의 해수순환이 보다 단순하게 파악될 수 있기 때문이다. 다음은 두 해수순환에서 발생하는 해수량의 변화가 같은 규모(order) 인지를 살펴본 것이다.

제주도 주변해역으로 겨울철에는 많고 여름철에는 적게 수송된 쿠로시오계 해수의 용적이 대한해협에서 겨울에 적고 여름에는 많은 변화를 보이는 대마난류수의 용적수송량의 변화와 같은 규모인지를 살펴보기 위하여, 동지나해와 제주도 주변해역에서 쿠로시오계 해수분포의 계절변화로 부터 계산된 해수의 용적과 대한해협에서 대마해류 수송량의 계절변화에 의한 해수용적을 비교하였다. 대마해류 수송량의 계절변화는 아직 확실한 결론에는 이르지 못하였으나 약 2Sv 정도로 볼 수 있다. Yi(1966)의 결과에 의한 대한해협의 용적수송량은 8월과 9월에 2.13Sv, 2월에는 0.19Sv으로 나타남을 보였으며 Miita and Ogawa(1984)의 해류관측 결과에서도 여름철에는 강하고 겨울철에는 약한 용적수송량으로 그 차이는 약 2Sv 정도이다. Fig. 2는 Fig.1의 34.0%로 본 쿠로시오계 해수와 연안수의 경계가 겨울과 여름에 달라지는 계절변화를 나타내며 이로부터 동지나해에 분포하는 쿠로시오계 해수의 용적 차이를 구할 수 있다. 해수분포로 본 해수용적 수송량의 차이는 변화면적이 약 150-200km²이고 평균 수심은 100m 정도로 해수순환의 계절변화가 6개월의 기간에 일어날 때 용적수송량은 약 1.5Sv 정도로 산출된다. 이값은 대한해협에서의 해수분포의 계절변화가 제주도 주변에서의 용적수송량의 계절변화에 의한 것으로 설명되어질

수 있다는 것을 의미한다. 쿠로시오해류의 변화는 확실한 계절변화로 나타나지 않고 계절에 관계없이 불규칙하게 변화하기 때문에(Nitani, 1972) 동지나해에서 복상하는 대마난류의 변화가 대한해협에서의 용적수송량의 계절변화를 일으킨다고 볼 수 없기 때문에, 이 결과는 대마해류를 이해하기 위해서는 동지나해의 해수순환을 파악해야 한다는 것을 말해준다.

동지나해 해수분포의 계절변화를 파악하는데 중요한 현상은, 양자강퇴 부근해역에 년중 분포하는(저운) 저염의 연안수분포이다. 이 연안수의 분포는 겨울에는 중국대륙에서 동지나해 쪽으로 실상의 분포를 하고 여름철에는 황해 남부에서 잠입하는 양상으로 분포하고 있음을 볼 수가 있다. 이는 이 해역에 공급되는 해수가 겨울에는 중국대륙을 따라 남하하는 중국대륙연안수이고, 여름에는 황해 남부역에서 제주도 서남방 해역을 지나 남하하는 황해저층냉수괴(Park, 1985)가 아닌가 추측하게 해준다. 이를 알아보기 위해 양자강퇴 부근해의 저염수와 쿠로시오계 해수의 경계해역(Fig. 2의 A)에 나타나는 50m층의 5년간 자료로 T-S Diagram을 Fig.3과 같이 구하였다. 그 결과 이 해역에는 여름철에 겨울철보다 더 찬 해수가 분포함을 알 수 있는데 이것은 여름철 저층의 찬 해수가 이 해역에서 겨울철에 생성된 해수가 아니며 어디에서 유입된 해수라는 것을 말해준다. 여름철에 이와같은 저온을 가진 해수는 주변해역 중 황해저층냉수 밖에 없기 때문에 이 해수는 황해저층냉수가 남하한 것이라고 볼 수 있다. 황해저층냉수가 여름철에 남하하는 문제는 황해와 동지나해의 해수순환을 밝히기 위해 앞으로 규명해야할 중요한 과제다.

본 연구의 한계에서 본다면 겨울철에는 제주도 북서해역에서 황해 중앙해역으로 해수가 유입되며 그 해수는 중국대륙을 따라 남하하여 일부는 양자강퇴 부근해역에 저온저염의 해수를 공급한다. 반대로 여름에는 중국대륙을 따라 연안수가 북상하며 한반도 연안을 북상한 연안수와 함께 황해 중앙해역을 통해 남하하여 역시 양자강퇴 부근해역에 저온저염수를 공급한다. Fig.1의 분포에서와 같이 양자강퇴 부근해역의 연안수는 여름철에 쿠

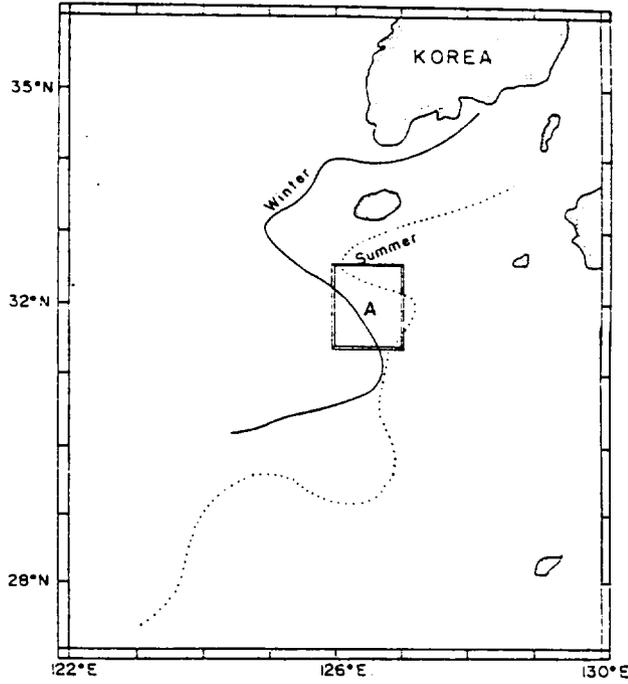


Fig. 2. Seasonal variation of the northern boundaries (34.0‰ isoline) of Kuroshio water areas in the East China Sea.

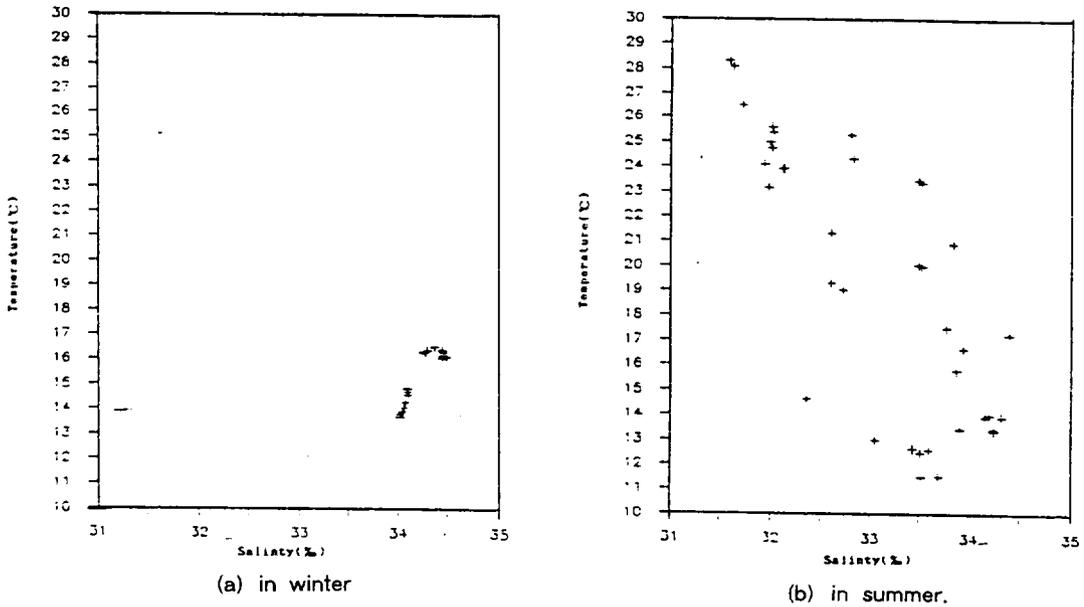


Fig. 3. T-S diagrams of 50m layer in the area of 126°E-127°E and 31°30'N (A in Fig. 2.).

로시오계 해수분포를 남쪽으로 밀어 동지나해에서 쿠로시오계 해수의 분포를 남동방향으로 후퇴시킨다. 대한해협에서 대마해류 유량의 계절변화를 발생시키는 원인으로 보이는 이러한 해수순환은 또한 겨울철 황해난류수의 유입과 여름철 황해저층 냉수의 남하의 원인으로 보인다. 그러나 소위 황해난류수로 표현되고 있는 황해로의 유출입은 가능한 역학이 제시되었음에도 (Park 1986, Pang 1987, Hsueh and Pang 1989) 아직 쿠로시오계 해수의 황해 유출입을 부정하는 견해와 (Lie 1984 1985, Nakao 1977, 등) 긍정적인 견해 (Byun and Chang 1988)로 나뉘어져 아직 해결되지 않고 있는 상태이다. 이 문제가 아직 명확히 해결되지 않고 있는 이유는 황해난류수가 매우 미약하고 불규칙한 형태의 흐름으로서 관측되어지기 매우 어렵기 때문이다. 그러므로 황해난류수의 존재는 다른

간접적인 방법으로 우선 밝혀져야 할 것이다. 본 연구에서는 다음에서 제주도 북서해역에서의 염분 분포와 그 계절변화를 해수흐름으로 설명하는 방법으로 황해난류수 존재를 정성적으로 살펴보았다.

3. Box Model

쿠로시오계 해수의 유출입을 고려하기 위해 해수표면으로 부터의 영향이 적은 50m층을 고려하였다. Box Model은 질량보존과 염보존이 이용되며 (Knauss 1977, Proudman 1953) Box는 Fig.4와 같이 설정되었다. 수치실험과 (Park and Kim 1987) 해류 관측 결과에 의하면 제주도 서안에서는 년중 북상하는 흐름이 있음을 알 수가 있다. 따라서 해수의 흐름은 제주도 서방을 통해 (단면A)

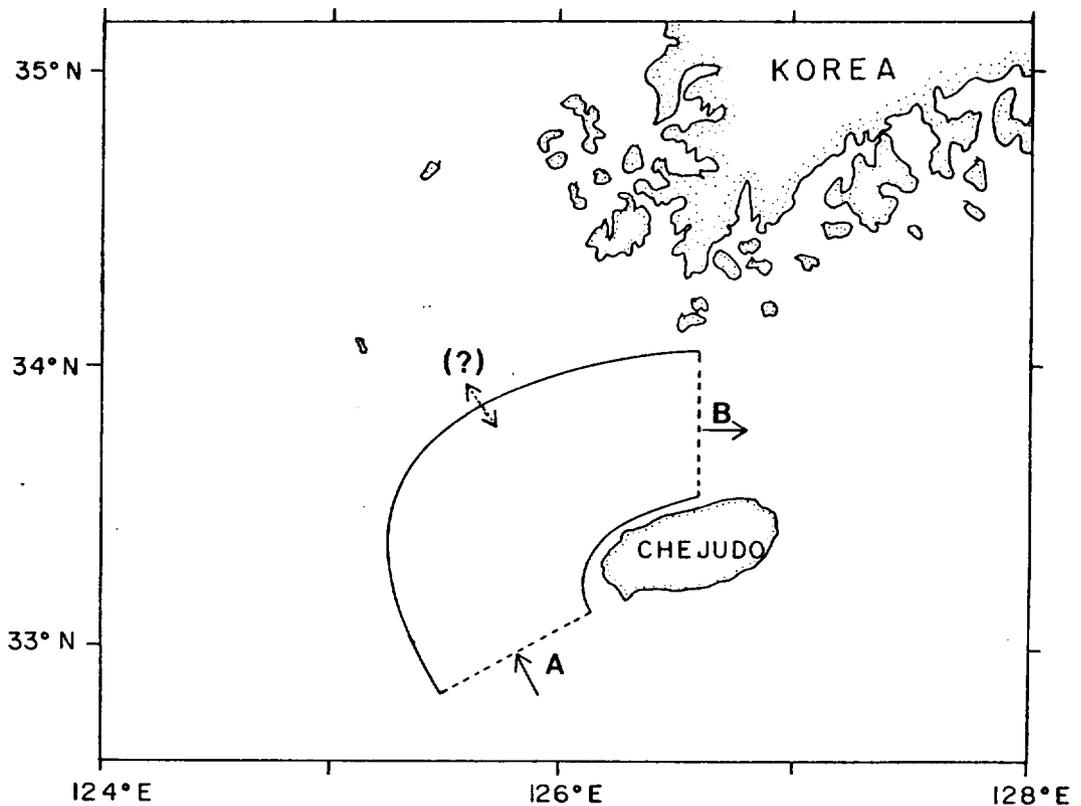


Fig. 4. Schematic representation of Box Model used in this paper.

유입되고 제주해협을 통해(단면B) 유출이 된다. 질량보존 방정식과 염분보존 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1 V_i - A_2 V_o + d\eta R = d\zeta R$$

$$A_1 V_i S_i - A_2 V_o S_o = dSHR/\Delta t$$

여기서 아랫첨자 i와 o는 유입과 유출되는 단면

을 나타내고, A, V, S, $d\eta$, $d\zeta$, Δt , dS, H, R 은 각각 단면적, 유속, 염분량, 강수량-증발량, 해수면의 변화량, 시간, Box내 염분의 변화량, 평균 수심 그리고 Box의 표면적을 나타낸다. 여기서 이용되는 변수들은 50m층의 평균 염분 분포에서 유추한 값으로 Table 1에 나타나 있다. 여름철 V_o 는 김(1987)에 의해 관측된 제주해협에서의 항류 유속을 취하였고 겨울철 V_i 는 제주도 서안에

Table 1. Values of each variable used in Box Model

	W i n t e r	S u m m e r
S_i (‰)	34.367	33.700
S_o (‰)	34.000	33.533
V_o (m/s)	?	0.07
V_i (m/s)	0.05	?
R (m ²)	1.34*10 ⁺¹⁰	
H (m)	40	
Δt (sec)	7,776,000	
A_i (m ²)	5,196,800	
A_o (m ²)	2,222,400	

서 관측된 값을 취하였다(KORDI, 1987). 이미 언급했듯이, 50m이심의 해수순환을 파악하고자 하므로 강수량과 해수면의 변화량은 무시할 수 있다. 그러므로 위식은 다음과 같이 간략하게 나타내어 진다.

$$A_1 V_i - A_2 V_o = 0$$

$$A_1 V_i S_i - A_2 V_o S_o = dSHR/\Delta t$$

제주도 서북방 해역에서 해수분포의 계절변화는 겨울에서 여름사이에는 저염화와 여름에서 겨울사

이에는 고염화 현상이 나타나고 있으므로 이 시기에 Box내의 염분변화(dS)는 각각 (-)값과 (+)값이 나타나게 된다. 그런데 여기서 중요한 사실은 단면 A를 통해 유입되는 해수의 염분은 단면 B를 통해 유출되는 해수의 염분보다 년중 높게 나타나는 것이다. 그러므로 여름에서 겨울 사이에는 물론 겨울에서 여름사이에도 고염수가 유입되고 저염수가 유출되므로 단면 A와 B로의 해수유출입은 년중 이 해역의 염분을 증가시키고 있다. Table 1의 값을 사용할 경우 겨울에서 여름사이에 염분변화는 약 1.38‰ 정도의 고염화 현상이 나타

나며 여름에서 겨울사이에 염분변화는 약 1.38% 이상의 고염화가 나타난다. 그러나 실제로는 겨울에서 여름사이에는 오히려 저염화 되고 있으며 여름에서 겨울사이에 이과같은 고염의 해수는 (약 35.5% 이상) 나타나지 않는다. 황해로의 해수유출입이 없다면 제주도 북서해역의 이러한 염분변화는 설명될 수 없다. 이 결과는 겨울에서 여름사이에 황해로부터 이 해역에 저염인 연안수가 유입되고 여름과 겨울사이에 이 해역에서 황해로 고염수가 유출되고 있다는 것을 말해 준다. 이 계산으로 보여지는 황해로의 유출입은 흐름의 세기가 대마난류수에 비해 매우 작으나 황해난류수는 반드시 있어야 함을 보여주고 있다.

이 황해난류수의 복상과 앞서의 황해저층냉수의 남하 현상으로 황해와 동지나해역에 계절에 따라 발생하는 해수순환이 황해와 제주도 주변해역 사이의 해수흐름의 계절변화로 나타남을 알 수 있다. 이 흐름의 변화는 계절에 따라 규칙적으로 나타나기 때문에 이 흐름의 변화를 발생시키는 요인은 서론에서 언급한 바와 같이 계절풍으로 볼 수 있다. 계절풍은 황해에 역풍류를 발생시키는데 그 이론의 적용과 (Park, 1986) 실제 계절풍을 사용한 Wave Model로의 재생은 이미 수행되었다 (Pang 1987, Huseh and Pang 1989). 본 논문에서는 실제 해안선과 실제 해저지형을 사용하였을 경우에도 역풍류현상이 발생하는지의 여부와 이 해수순환의 경로를 알아보기 위하여 다음에 계절풍을 사용하여 수치모델실험을 하였다.

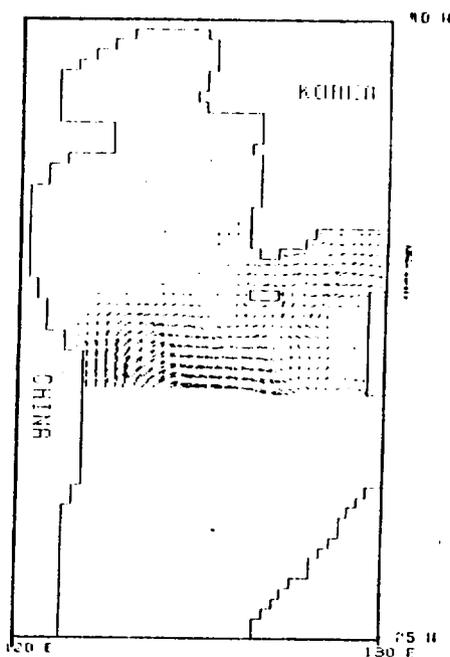
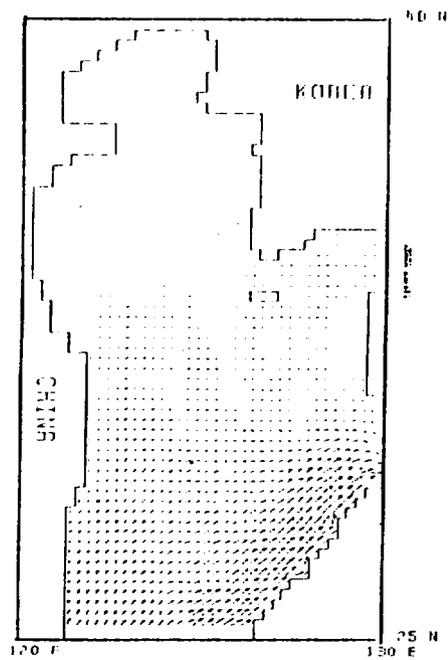
4. 수치모델 실험

동지나해 및 제주도 주변해역의 해수순환에 있어서 계절풍의 영향을 살펴보기 위하여 유한차분법을 적용한 Barotropic Heap Model (Flather and Heaps 1975)을 이용하여 수치모델 실험을 하였다. 본 연구에서는 이 모델에 바람응력(wind stress)을 추가하여 계절풍의 영향을 살펴보았으며 비선형항은 제외시켜서 수행하였다. 각 격자망의 동서, 남북방향의 거리는 모두 15miles (22,780 m)이며 쿠로시오해류가 유입되는 남부 개방경계

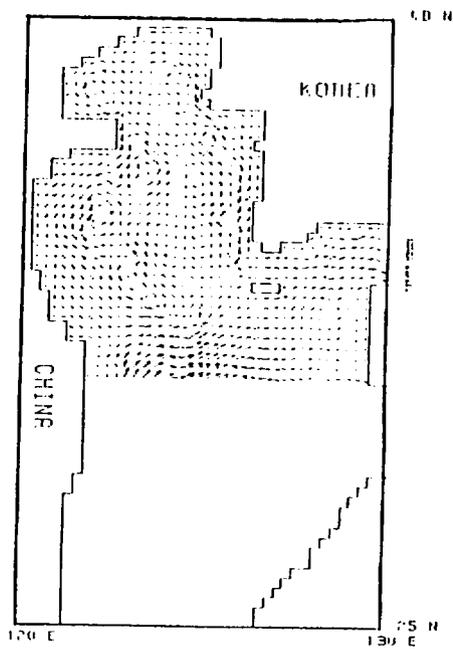
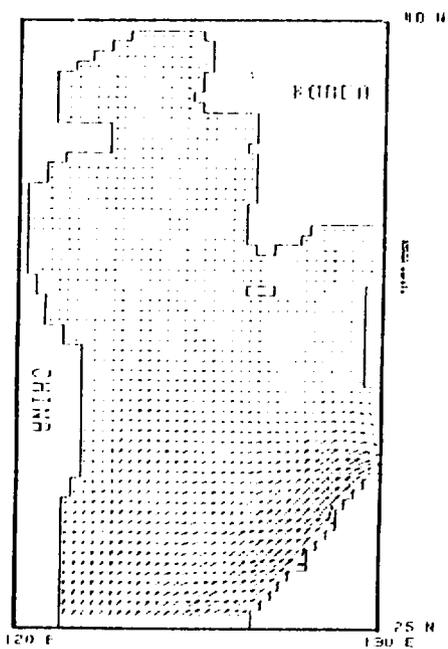
(open boundary)에서는 항상 일정한 해수가 유입이 될 수 있도록 하였고 해수가 모델 밖으로 유출되는 서부 개방경계에서는 해수가 강제적으로 유출되는 것을 피하기 위해서 자유 경계조건을 사용하였다. 이것은 대부분의 수치실험에서와 같이 강제 경계조건을 사용할 경우 대마해류가 강제적으로 복상하게 되며 따라서 동지나해에 우리가 원하는 않는 강제적인 흐름이 발생케 되는데 이것을 피하기 위한 것이다. 저층마찰계수는 수심에 따라 다르게 사용하는데 ($h < 50m$ 에서 $k=0.0025$, $50m \leq h < 100m$ 에서 $k=0.005$, $100m \leq h < 200m$ 에서 $k=0.01$, $200m \leq h$ 에서 $k=0.025$) 그 이유는 남부 경계에서 주어지는 초기의 해수유입이 정북방향이므로 모델해역으로 유입된 해수가 갑자기 심한 수심변화를 겪고 그로인한 vorticity의 변화가 쿠로시오해류를 남쪽으로 물리게 하여 실제와 다른 해류를 보이기 때문이다. 이 현상은 model의 남부 경계에서의 해수의 유입이 초기에 실제와 같이 등수심선을 따라 주어지지 않기 때문에 나타나는 현상으로 vorticity변화를 완화시키기 위해 저층마찰계수를 수심에 따라 다르게 함으로써 제거할 수 있었다. 계절풍의 영향은 겨울철에는 북풍, 여름철에는 남풍의 성분을 사용하였는데 모두 10m/s로 일정한 바람의 효과를 고려하였다.

Fig.5의 (a)는 바람의 영향을 고려하지 않고, 단지 남부의 경계역에서 쿠로시오해류의 유입만을 주었을 때의 동지나해 해수순환이다. 북쪽 해역만이 표시된 오른쪽 그림은 전해역이 표시된 왼쪽 그림에서 해류규모가 쿠로시오해류에 비해 작아 나타나지 않는 부분을 확대하여 그린 것으로 해류모양은 왼쪽 그림과 같다. 대부분의 해수는 Kyushu 남부의 Tokara해협을 통해 유출이 되고 있고 일부만이 대한해협으로 유출이 되고 있음이 보인다. 본 그림에서는 황해에서 해수의 흐름이 나타나지 않고 있는 것은 황해로 유입되는 해류의 세기가 미약하기 때문이며 바람이 없을 때는 황해의 해수순환이 매우 작다는 것을 보여준다.

Fig.5의 (b)와 (c)는 각각 북풍과 남풍 때의 해수순환을 보여준다. 쿠로시오 해수역에서의 해수순환은 바람의 영향이 해류의 세기에 비해 작기



(a)



(b)

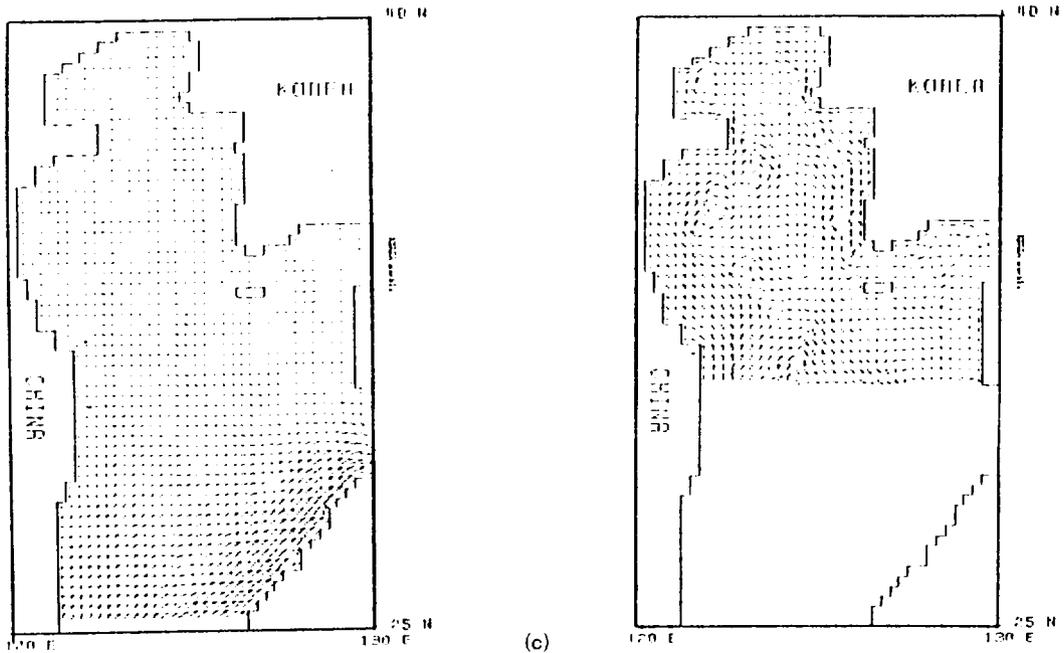


Fig. 5. Numerical results of the circulations in the East China Sea and Yellow Sea driven by (a) only the Kuroshio Current, (b) the Kuroshio Current and Northerly Winds, and (c) the Kuroshio Current and Southerly Winds.

때문에 계절변화가 나타나지 않는다. 그러나 해류 세기가 미약한 제주도 서남방과 황해에서는 바람의 영향에 의해 해수순환이 나타나며 그 흐름은 계절풍의 방향에 따라 완전히 반대로 나타난다. 한국이나 중국 연안을 따라서는 바람의 방향과 같은 해류가 나타나는데 비해 황해 중부역과 제주도 서북방 해역에서는 바람의 방향과는 반대되는 방향의 흐름이 나타난다. 즉 황해의 골에 해당하는 해역에서는 지형에 의해 복잡하기는 하나 북풍 때에는 북상하는 해수의 흐름이 나타나고 남풍 때에는 남하하는 해수의 흐름이 보이고 있다. 이것은 실제 해안선과 해저지형을 사용한 수치모델에서도 역풍류가 나타난 것이며 역풍류(Upwind flow)에 대한 앞서의 여러 연구결과를(Hsueh and Romea 1983, Park 1986, Pang 1987, Hsueh and Pang 1989) 뒷받침해 준다.

바람의 영향을 고려하지 않고 단지 남부 경계역에서의 해수 유입으로 수치실험을 하였을 경우 황해와 제주도 주변해역의 해수순환은 상당히 미약

하고 더욱이 황해 내부의 해수순환은 나타나지 않음에 반하여 바람의 영향을 고려하였을 때 제주도 주변해역과 황해에 해수순환이 발생하고 그 순환이 바람의 방향에 따라 바뀐다는 것은 이 해역의 해수순환이 계절풍의 영향에 의한 것임을 보여준다. 이러한 계절풍에 의한 해수순환은 1차적인 해수순환의 흐름에 비해 매우 미약한 2차적인 해수순환이며 쿠로시오해수역에서는 나타나지 않고 그 외의 대부분의 동지나해역에 영향을 나타낸다. 이 해수순환은 황해와 동지나해역의 해수순환을 이해하는데 매우 중요한 흐름으로 이 해역에 발생하는 대부분의 계절현상의 요인으로 보인다. 우선 1차 해수순환에 영향을 주어 대한해협에서 대마난류수 유량을 계절변화시키며 겨울철 황해난류수의 유입과 여름철 황해저층냉수의 남하와 같은 해류는 물론 여름철에 양자강 연안수가 제주도 주변해역으로 유입되는 현상도 이 해수순환에 의한 것으로 보인다.

Fig. 6는 이러한 해수순환을 종합하여 모식도로

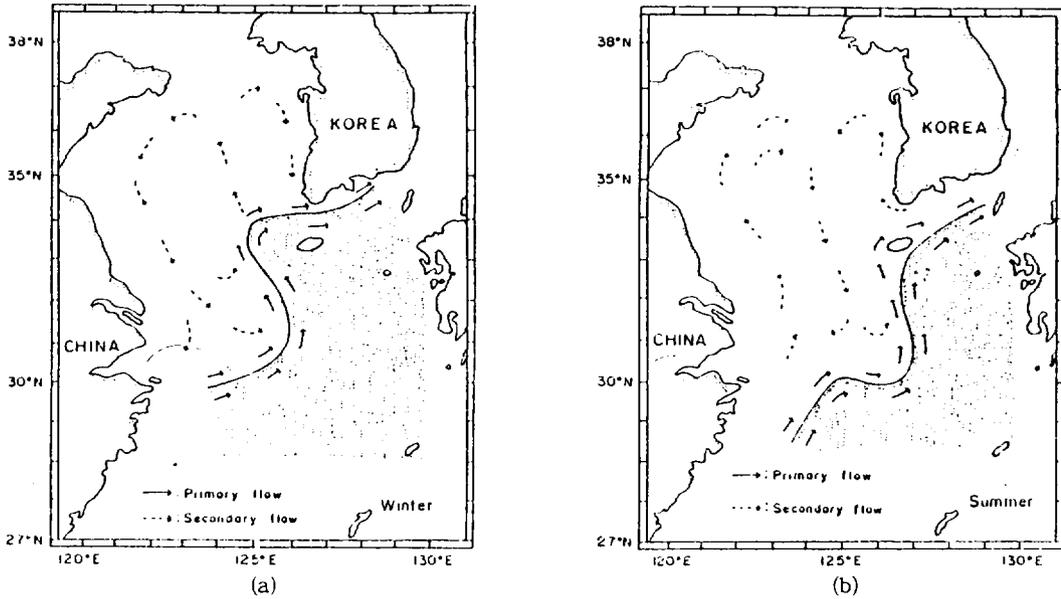


Fig. 6. Schematic representation of the circulation in the Yellow and East China Sea.

그런 것이다. (a)는 겨울철에 나타나는 해수순환으로 북서계절풍에 의한 역풍류효과는 제주도 북서방 해역에서 황해로 쿠로시오계 해수를 유입시켜 쿠로시오계 해수의 분포를 동지나해에서 북서방향으로 확장시키며 그 결과 대한해협을 통해 동해로 유출되는 대마난류수 유량을 감소시킨다. 황해로 유입되어 북상한 해수는 한반도와 중국연안을 따라 남하하는데 중국대륙을 따라 남하하는 연안수의 일부는 양자강퇴에 유입된다. (b)는 여름철에 나타나는 해수순환으로 남동계절풍에 의한 역풍류효과는 반대로 황해에서 제주도 북서방 해역으로 해수를 남하시켜 쿠로시오계 해수의 분포를 동지나해에서 남동방향으로 후퇴시키며 그 결과 대한해협을 통해 동해로 유출되는 대마난류수 유량을 증가시킨다. 황해에서 유출되는 해수는 양자강퇴로 향하며 다시 1차 해수순환을 따라 제주도 주변해역으로 북상하는데, 황해에서의 유출은 한반도와 중국연안을 따라 북상한 해수가 메우어주기 때문에 여름철에 양자강에서 흘러나오는 담수가 이 순환을 따라 제주도 부근해역에 이르기 쉽게된다.

5. 결 론

- 1) 황해와 동지나해에서 쿠로시오계 해수분포의 계절변화는 겨울철에 북서방향으로 확장되고 여름철에 남동방향으로 후퇴하는데 이 변화가 대한해협에서 유출되는 대마난류수의 유량을 계절변화시키는 것으로 보인다.
- 2) 제주도 북서방 해역의 염분변화는 제주도 서북방 해역과 황해사이에 해수의 유출입이 반드시 있어야 한다는 것을 보여준다. 그 흐름은 북서계절풍이 부는 겨울철에는 제주도 북서해역에서 황해로 고온고염의 쿠로시오계 해수를, 남동계절풍이 부는 여름철에는 반대로 황해에서 제주도 북서해역으로 저온저염의 해수를 흐르게 한다. 이 결과 동지나해에는 여름철에 겨울철보다 찬 저층해수가 나타난다.
- 3) 실제 해안선과 해저지형의 수치모델 실험결과, 제주도 북서방 해역과 황해 중앙 끝을 따라 바람의 방향과는 반대 방향이 역풍류가 나타나며 황해와 제주도 북서해역의 해수순환을 보여준다. 이로부터 동지나해의 해수분포를 일으키는 황해로의 유출입이 계절풍에 의한 것임을 알 수 있다.

6. 토 의

양자강퇴 부근해역에는 저염수가 년중 와류를 형성하고 있으며 이 저염수의 분포는 여름철에 비해 겨울철에 서쪽으로 약간 이동된 양상을 보이는데 (Mao et al, 1983) 이 와류는 Fig.6에서와 같이 주변해역의 흐름과 연결되어 년중 반시계 방향으로 회전하는 것으로 보인다.

대한해협에서 용적수송량의 계절변화물 살필 때 동지나해로 북상하는 쿠로시오 해수량의 계절변화가 없다고 가정하였다. 그러나 이 계절변화는 아직 밝혀지지 않은 상태이며, 황해와 동지나해의 해수순환을 연구하기 위해서는 앞으로 보다 상세히 밝혀져야 할 것이다.

대마난류는 Kyushu 남서쪽에서 쿠로시오해류로부터 분기되어 북상한다고 믿어지고 있으나 수치모델에서 본 바와 같이 이 흐름은 해저지형에 의한 자연스러운 흐름은 아니다. 현재 북상원인으로는 Tuskaru 해협과 대한해협에서의 해수면의 차이에 의한 영향(Minato and Kumura, 1980)과 동지나해에서의 Reynold's stress (Ichiye, 1984)에 의한 영향 등이 보고되었으며, 그 외에 대만의 가까운 동쪽해역을 통해 유입되는 해수에 의한 해류(안, 1986)와 밀도류 등이 있다. 그러나 대마난류의 북상 원인은 아직 밝혀지지 않은 상태이며 황해와 동지나해의 해수순환 연구를 위해서 역시 규명되어야 할 과제이다.

본 연구결과로는 대만북쪽으로 유입되는 해류는 여름에 강하고 겨울에 약할 것으로 추측된다.

참 고 문 헌

- 안희수, 1985. 2층 밀도 성층 모델을 이용한 황해 및 동지나해 순환의 수치실험. 한국 지구과학 학회지, 6, 43-48.
- Byun, S. K. and K. I. Chang, 1988. Tsushima current water at entrance of the Korea strait in Autumn. Prog. Oceanog., 21, 295-296.
- Flather, R. A. and N. S. Heaps, 1987. Tidal Computations for Morecambe Bay. Geophys. J. R. Astr. Soc., 41, 439-517.
- Nitani, H., 1972. Beginning of the Kuroshio: KUROSHIO, Stommel, H. and K. Yoshida, editor, Univ. of Tokyo Press, Japan, 129-163.
- Hsueh, Y., 1988. Recent current Observations in the Eastern yellow Sea. J. Geophys. Res., 93, 6876-6884.
- , and I. C. Pang, 1989. Coastally Tapped Long Wave in the Yellow Sea. J. Phys. Oceanog., 19, 612-625.
- , and R. D. Roa, 1983. Wintertime winds and Coastally sealevel fluctuations in the northeast China Sea. Part: I. Observations. J. Phys. Oceanog., 13, 2091-2106.
- Ichiye T., 1984. Some problems of circulation hydrography of Japan Sea and the tsushima current: In Ocean hydrodynamic of the Japan and East China Sea. T. Ichiye, editor, Elsevier, Amsterdam, 15-54.
- 김상현, 1987. 제주 해협의 해류 유동에 관한 연구. 제주대학교 석사학위논문, pp.63.
- Knauss, J., 1978. Introduction of Physical Oceanography. Prentice-Hall, pp.339.
- KORDI, 1987. 한국해역 종합해양자원도 작성연구. 남해, BSPG00046-163-7.
- Lie, H. J., 1984. A Note on water Masses and General Circulation in the Yellow Sea(Hwanghae). J. of Oceanog. Soc. Korea, 19, 187-194.
- , 1985. Wintertie Temperature and Salinity Characteristic in the Southweatern

- Hwanghae (Yellow Sea). *J. of Oceanog. Soc. Japan*, 41, 281-291.
- Mao, H., I. Hu, B. Zhao, and Z. Ding. 1983. A cyclonic eddy in the Northern East China Sea: Sedimentation on the continental Shelf with Special Reference to the East China Sea. *Acta*, editor, *Oceanologica Sinica*. China Ocean Press, Beijing.
- Miita, T. and Y. Ogawa, 1984. Tsushima currents measured with Current meter and Drifters: In *Ocean hydrodynamic of the Japan and East China Sea*. T. Ichiye, editor, Elsevier, Amsterdam, 15-54.
- 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-k367.
- Minato, S. and K. Kimura, 1980. Volume transport of the western boundary current penetrating into a marginal sea. *J. of Oceanog. Soc. Japan*, 36, 185-195.
- Pang, I. C., 1987. Theory of coastally trapped waves and its application to the Yellow Sea. Ph. d. dissertation, Florida State Univ., Tallahassee, pp.128.
- 방익찬, 김태희, 1989. 동지나해 해수 분포의 계절 변화와 해수 순환. *제주대학교 논문집*, 28, 61-73.
- Park, Y. H., 1985. Some Important Summer Oceanographic Phenomena in the East China Sea. *J. of Oceanog. Soc. Korea*, 20, 12-21.
- , 1986. A Simple theoretical Model for the Upwind flow in the Southern Yellow Sea. *J. of Oceanog. Soc. Korea*, 21, 203-210.
- , and S. I. Kim, 1987. A Numerical method study on tide-induced residual currents around Chejudo Island. *J. of Oceanog. Soc. Korea*, 23, 9-18.
- Proudman, J., 1953. *Dynamical Oceanography*. Great Britain, pp.409.
- Yi, S. U., 1966. Seasonal and Secular variation of the water volume transport across the Korea strait. *J. of Oceanog. Soc. Korea*, 1, 7-13.