

## 對馬暖流 形成에 미치는 季節別 바람의 影響 Effects of Seasonal Wind Stress on the Formation of the Tsushima Warm Current

南琇庸\* · 石文植\* · 方仁權\* · 朴弼聖\*

Soo Yong Nam\*, Moon Sik Suk\*, In Kweon Bang\* and Pil Seong Park\*

**要 旨** : 본 연구에서는 순압모델을 이용하여 대마난류(Tsushima Warm Current)의 분기기작 및 계절별 분기위치의 변화에 바람이 미치는 영향을 살펴보았다. 모델 격자간격은 위도와 경도방향 모두 0.25°로 하였고 해수표면에 적용한 계절별 바람응력은 HELLERMAN AND ROSENSTEIN(1983)의 바람을 이용하였다. 모델결과에 의하면 대마난류는 북풍계열의 바람이 강한 동계(10월-3월)에는 일본 큐슈 남서쪽 대륙사면에서 쿠로시오로부터 직접 분기되어 형성되며, 하계(4월-9월)에는 대만해협(Taiwan Strait)을 통해 유입된 대만난류가 대마난류의 기원으로 나타난다. 쿠로시오는 동계에 최대 수송량을 가지며 하계에 최소를 보이고, 대만난류(Taiwan Current)의 수송량은 이러한 쿠로시오와 약 160도의 위상차를 갖는다. 대마난류의 수송량 변화는 쿠로시오의 변화와 120°의 위상차(약 4개월)를 가질 때 잘 일치한다.

**Abstract** □ The separation mechanism of the Tsushima Warm Current and the effects of seasonal wind stress on the separation position are studied by use of a barotropic numerical model. The grid spacing of 0.25° both in latitude and longitude is used in the model, and HELLERMAN AND ROSENSTEIN'S wind (1983) is applied to the sea surface as seasonal wind stress. According to the model results, during winter seasons (from October to March) when northerly wind is prevailing, the Tsushima Warm Current is formed by direct separation from the Kuroshio on the continental slope southwest of Kyushu. On the other hand, during summer seasons (from April to September), the Taiwan Current that flows through the Taiwan Strait seems to be the origin of the Tsushima Warm Current. The Kuroshio reaches its maximum transport during winter seasons, and the minimum during summer. The transport of the Taiwan Current shows a phase lag of about 160° relative to the Kuroshio. The transport variation of the Tsushima Warm Current agrees with that of the Kuroshio when the former is shifted by 120° (about 4 months).

### 1. 緒 論

쿠로시오 해류는 필리핀 남단(북위 12도)에서 시작하여 대만 동부와 동중국해의 대륙사면을 따라 흐르다가, 대부분 일본 남쪽 경계를 따라 흐른다. 그 일부가 동중국해로 유입되며 동중국해 연안수와 혼합되어 북동향한다. 북적도 해류의 수송량은 대략 55 Sv(1 Sv=10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/sec)이며 그 수송량의 2/3가 쿠로시오의 수송량으로써 약 35-40 Sv 정도이다(Nitani, 1972). 이러한 쿠로시오는 잘 알려진 바와 같이 동

중국해 대륙봉역으로 진입하는 두 가지 작은 해류의 기원이 된다. 즉, 이는 동중국해 남서해역의 대만난류와 남동해역의 대마난류이다. 대만난류는 쿠로시오 수의 특성을 지닌 대만 북부역에서의 북향류를 칭하며 외양과 연안의 두 지류를 갖는 것으로 알려져 왔으며, 또한 대마난류의 기원일 가능성도 제시되어 왔다(Su and Pan, 1987; Yuan and Su, 1988). 대마난류 또한 쿠로시오 해류의 지류로 알려져 왔으며 한국과 일본 사이에 위치한 대한해협으로 유입되어 일본 북부해협을 통해 쿠로시오에 다시 합류하며 그 수송량은

\*韓國海洋研究所 海洋物理研究部 (Physical Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 107, Yusong, Pusan 425-600, Korea)

동계에는 약 0.3 Sv, 하계에는 2 Sv 정도로 쿠로시오의 수송량에 비해 아주 작은 것으로 알려져 있다(Moriyasu, 1972; Yi, 1966). 이 두 지류는 동중국해뿐 아니라 황해와 동해의 수괴에 큰 영향을 미친다. 더욱 대마난류는 동해 및 황해에 열과 염을 공급하는 유일한 해류로 특히 동해 남부해역의 상층순환과 해수의 물리적 특성을 결정하는 주된 요소이다. 따라서 대마난류의 경로와 수송량의 계절변동은 한반도 주변 해황변동에 결정적인 역할을 한다. 그러므로 우리나라 주변해역의 해황은 쿠로시오의 변동에 밀접한 관계를 갖는 대마난류에 의해 결정되기 때문에 쿠로시오와 함께 일체적 개념에서 연구되어야 한다.

대마난류의 기원은 크게 3가지로 분류할 수 있는데, 그 첫번째가 대마난류는 대륙사면의 경계를 따라 흐르는 쿠로시오와 동중국해 연안수의 혼합수가 넓은 영역에서 북상하여 형성(Lim, 1971; Nagata, 1981)되는 것이며, 둘째는 일본 큐슈 서쪽 복단의 대륙사면을 넘어오는 쿠로시오수의 유입으로 형성되는 것이고(Huh, 1982), 세번째는 쿠로시오로부터 직접 분기되어 형성될 수 있다는 것이다(Chern and Wang, 1990; Qiu and Imasato, 1990). 그 외에도 대마난류는 수평 레이놀즈 스트레사나 해저지형에 의해 기인된 쿠로시오의 측류(Lateral flow)를 통해 형성될 수 있다는 주장도 있었다(Ichiye, 1984).

Minato and Kimura(1980)는 연해 입구에 지형류적 가정을 한 간단한 해석모델을 통해 서안경계류는 연해의 남단을 통해 연해로 유입될 수 있음을 보였다. 또한 Chang(1993)도 순압모델 및 semi-spectral 모델을 이용하여 서안경계류가 연해로 유입되는 곳은 연해입구의 남단으로 부터이며 서안경계류의 분기위도에 따라 연해로 유입되는 수송량도 변화할 수 있다는 새로운 가능성을 제시하였다. Guan(1986)은 관측결과를 토대로 쿠로시오가 대만 부근 해역을 통해 동중국해로 유입되어 대만난류를 형성하며 이 해류가 대마난류의 기원일 것이라고 추측하였다(Beardsley *et al.*, 1985; Guan, 1991; Seung and Nam, 1992; Fang *et al.*, 1991). Lie *et al.* (1993)은 일본 큐슈 서부(북위 31°에서 32°와 동경 126°와 129° 사이) 해역에서 3년에 걸쳐 10개의 ARGOS 인공위성 추적부이 실험을 실시하였다. 실험결과에 의하면 100 m 등수 심선 보다 깊은 곳에 투하한 부이는 쿠로시오에 합류하였으며, 100 m 보다 얇은 곳에 투하한 부이는

북동향하여 대한해협을 통해 동해로 유입되었다. Hsueh(1992)는 쿠로시오수의 일부분이 대륙사면을 넘어 표층류로써 연해로 유입되어 대만난류를 형성하며, 그 유입되는 수송량은 쿠로시오와 연해와의 수심비율의 제곱근에 비례하는 것으로 설명하였다. Guo(1987)의 관측결과에 의하면 대만난류는 남풍이 강한 하계에는 중국과 대만 사이의 대만해협을 통해 형성되며 북풍이 우세한 동계에는 대만북동부를 통해 흐른다. Guan(1983b, 1980)은 장기간의 GEK 자료와 수리자료에 의해 결정된 쿠로시오와 대마난류의 수송량은 약 180°의 위상 차를 갖는 것으로 설명하였다.

이와 같이 대마난류의 분기기작 및 동중국해에서의 해황에 대한 연구에 있어서 대부분 국지적 관측결과를 토대로 연구되어졌거나, 모델을 이용한 연구에 있어서도 제한적인 계산영역 및 개방 경계조건, 즉 대한해협을 배제하거나 또는 개방경계로 취급함으로써 대마난류의 연구에 제한성을 갖고 있었다(Chao, 1991; Hsueh *et al.*, 1986; Wang and Su, 1987). 또한 전 지구적 모델영역으로 한 경압모델에서는 동중국해 및 남중국해와 같은 연해는 제외되고 수행되어졌다(Semtner, 1988; Cox, 1975). 본 연구에서는 이와 같은 제한성을 최소화 하기 위해 쿠로시오 해류계와 주변 해류계를 포함하는 해역으로 북위 12°-50°, 동경 110°-160°에 이르는 북서 태평양과 그 주변해인 황해, 동해 그리고 동중국해와 남중국해 일부를 포함하는 지역을 모델영역으로 하였다(Fig. 1). 실제지형과 월별 바람 응력을 적용한 순압모델을 이용하여 쿠로시오와 같은 서안경계류의 계절변화, 이러한 쿠로시오로부터 연해로 분기되는 수송량 및 분기위치의 계절변화를 살펴 보고자 한다.

## 2. Model

지배방정식인 운동방정식과 연속방정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{f}\vec{K} \times \vec{V} = -\nabla \frac{P}{\rho_0} - \frac{C_D |\vec{V}| \vec{V}}{H} + \frac{\vec{\tau}}{\rho_0 H} + A_M \nabla^2 \vec{V} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (H\vec{V}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho g$$

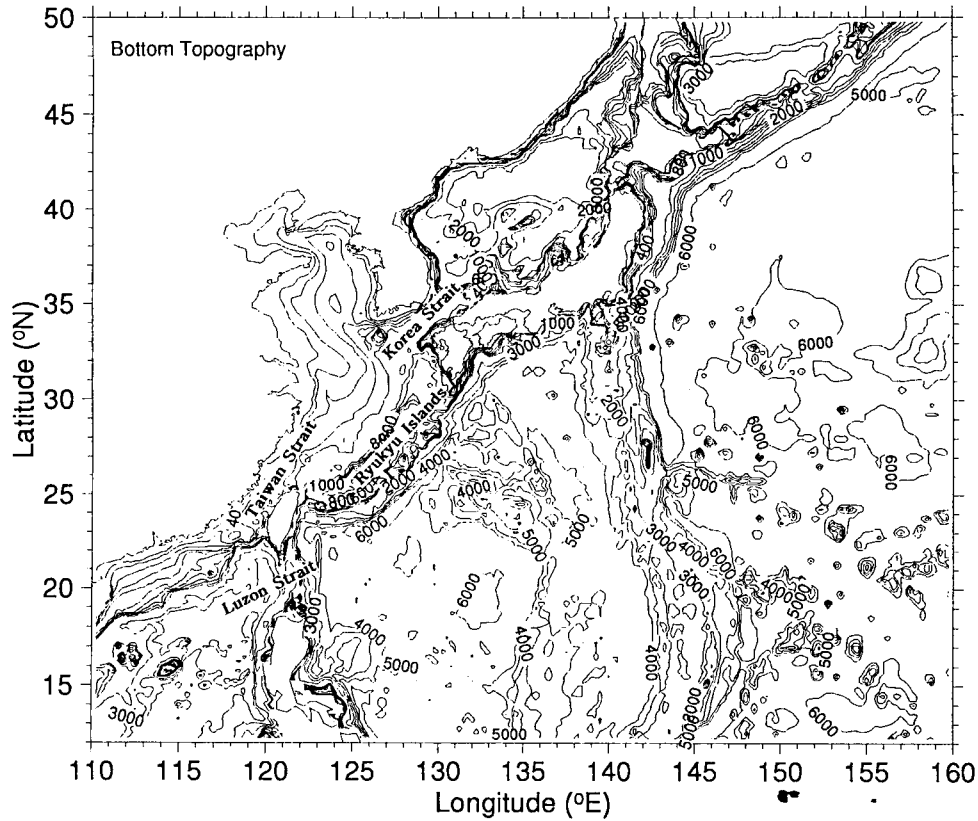


Fig. 1. Model domain and bottom topography.

- 여기서  $\vec{V}$  : 수평성분 속도벡터
- $\rho_0$  : 평균 해수밀도
- $A_M$  : 와동점성계수
- $f=2\omega \sin\phi$  : 코리올리 변수( $\phi$ : 위도,
- $\omega$  : 지구자전 각속도)
- $\vec{K}$  : 수직방향 단위벡터
- $\vec{\tau}$  : 바람응력 벡터
- $C_D$  : 해저 마찰계수

식 (2)를 이용하여 다음과 같이 유선함수( $\Psi$ )를 정의하고

$$u = \frac{\partial \Psi}{Ha \partial \phi}, \quad v = \frac{\partial \Psi}{Ha \cos \phi \partial \lambda} \quad (4)$$

식 (1)에 curl을 취한후 (4)식을 이용하면 유선함수로 표현된 와도방정식을 얻는다. 해수표면은 rigid lid로 가정하고 해저면에는 quadratic bottom friction을

당함으로 동경 160°에 주어진 개방 경계조건은 Stommel(1948)의 해와 같게 다음과 같이 주었다.

$$\Psi(y) = \Psi_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{L}y\right) \quad (5)$$

여기서 L은 남북방향으로의 모델크기이고 y는 남쪽 경계로부터 북쪽방향의 위치를 나타내고  $\Psi_{\max}$ 는 쿠로시오의 최대수송량을 말한다. 쿠로시오가 일본연안으로부터 분기되는 것을 나타내기 위해 동경 160°에 주어진 개방경계에서 북위 36° 이북은 최대 -5 Sv의 음의 유선함수 값을 갖도록 하였고, 그 이남은 최대 55 Sv를 갖도록하였다(Nitani, 1972). 해안선을 따라서 대부분 경계(육지와 접한)에 no-slip 조건을 적용하였지만 동경 125°-160°에 이르는 남쪽경계와 동경 145°-160°까지의 북쪽경계(subtropical gyre의 남쪽경계)에는 slip 조건을 부여하여 실제 경계조건과 비슷하게 적용하였다. 격자구성은 Arakawa의 B-Grid를 사용하였고 격자는 0.25° 간격으로 201×153으로 하였다.

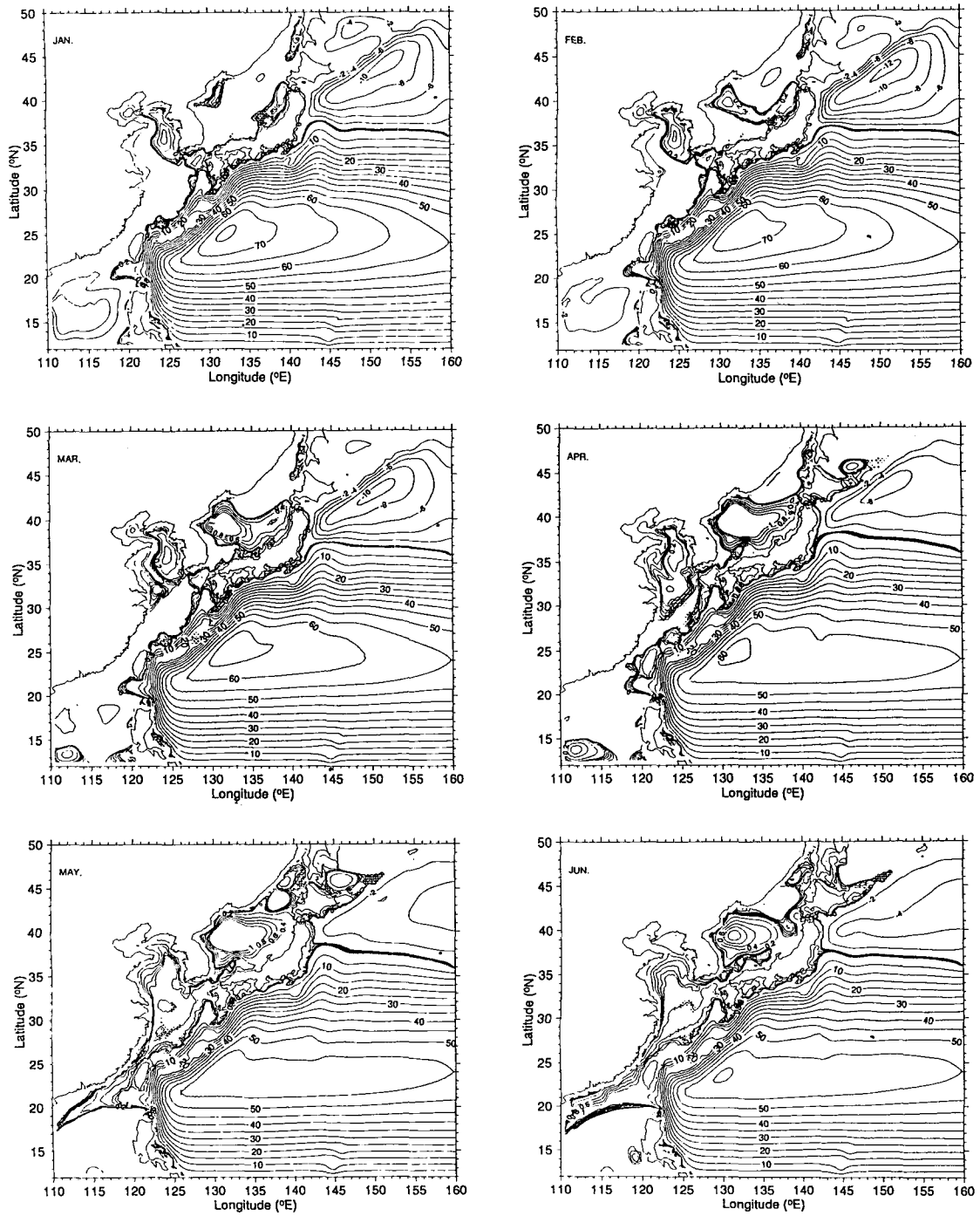


Fig. 2. Horizontal distributions of monthly stream function of experiment 1.

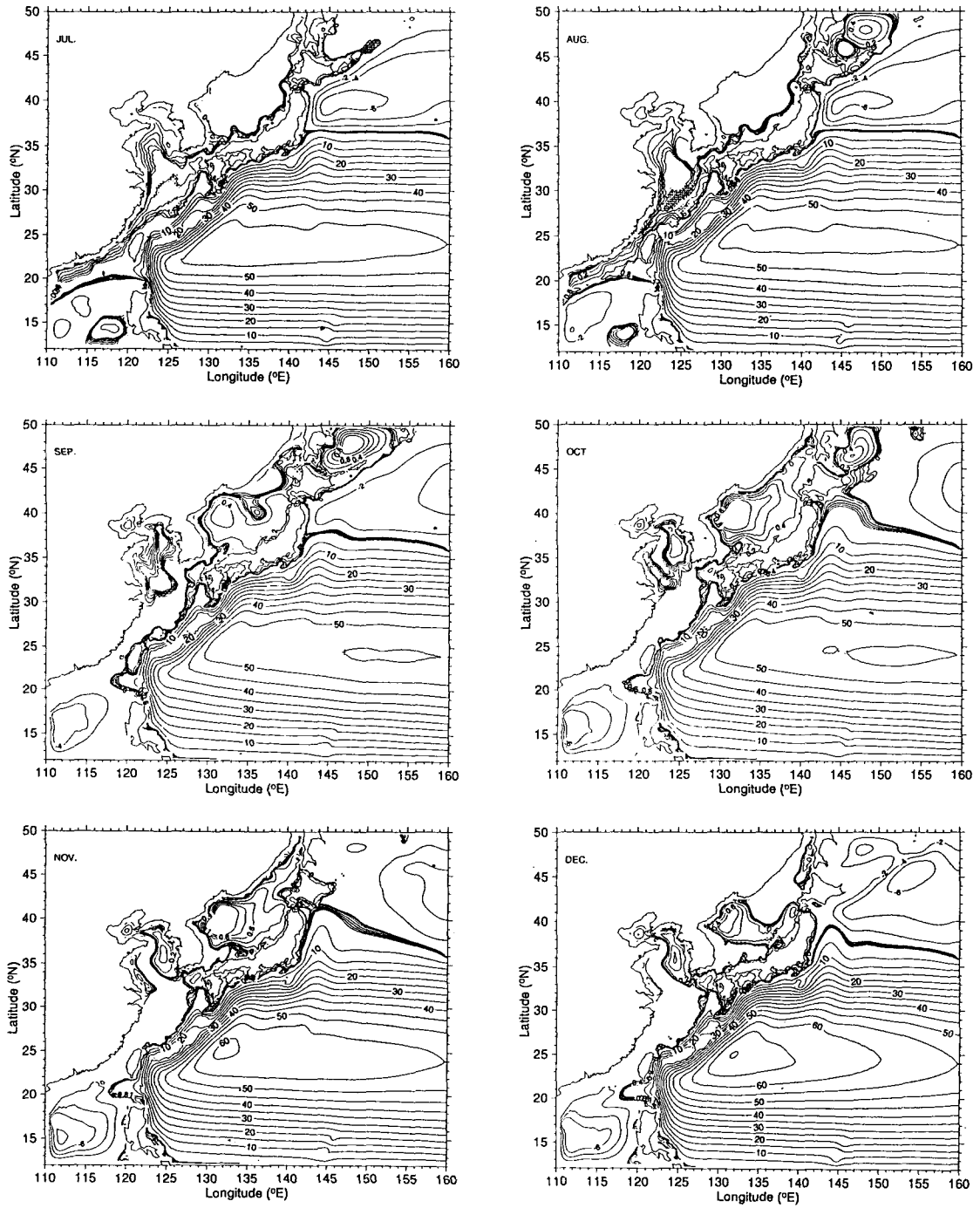


Fig. 2. Continued.

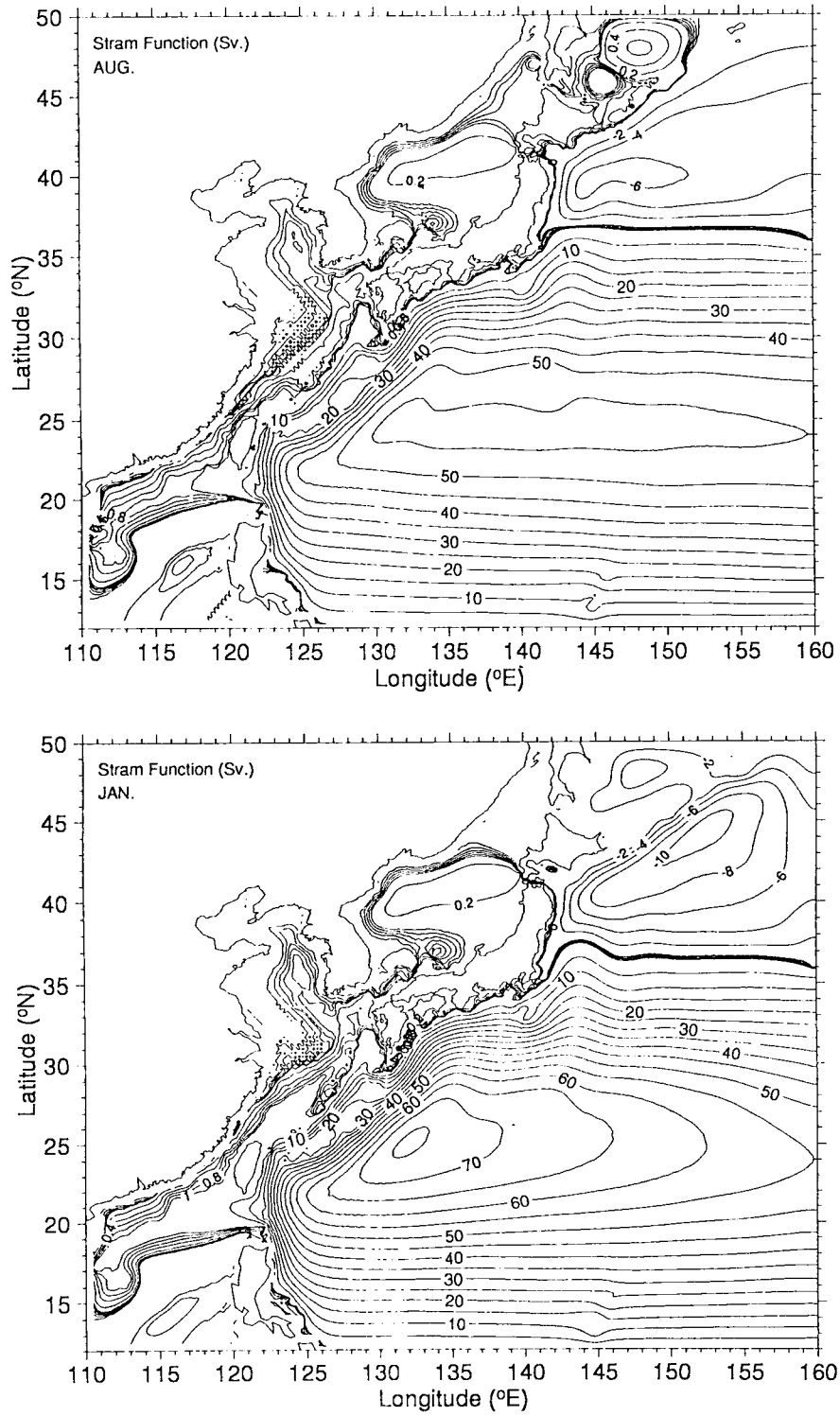


Fig. 3. Horizontal distributions of stream function in January and August of experiment 2.

점성계수는  $2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 주었다. 섬에서 유선함수 값을 얻기위해 Hole relaxation 방법(Takano, 1974)을 사용하였다.

해수표면에는 Hellerman and Rosenstein(1983)의 월별 바람응력을 적용하였고 해저수심에 있어서는 최대수심을 500 m로 하였고, 수심이 500 m 보다 얇은 지역은 실제 수심을 갖도록 하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 대마난류 분기위치의 계절변화

대마난류의 형성에 있어서 계절별 바람의 영향을 살펴보기 위해 실험 1에서는 전체 모델영역에 계절별 바람응력을 적용하였고 실험 2에서는 쿠로시오 해역에만 바람응력을 적용하였다. 그림에서 유선함수의 분포선의 간격은 5 Sv 이상은 5 Sv이며, 0.2-1 Sv 사이는 0.2 Sv, 0.02-0.1 Sv 사이는 0.02 Sv이고, 음의 유선함수는 2 Sv 간격으로 나타내었다. 대양에서 유선함수 분포는, 실험 1과 2 모두, 전 계절 서안강화(Western Intensification)로 인해 형성된 쿠로시오가 대만 동북부와 일본 큐슈 사이의 수심이 급격히 변하는 경계지역을 따라 흐르다 대부분 북위  $37^\circ$ 에서 일본연안으로 부터 분기되어 동쪽으로 흐르며 북위  $37^\circ$  이북 지역은 반 시계방향류를 갖는다. 또한 대만 동북부와 일본 큐슈 사이에 위치한 류큐열도(Ryukyu Islands)의 영향으로 인해 류큐열도 북쪽으로는 수송량은 전체 수송량의 약 1/5-1/3 정도인 10-20 Sv 정도이며 이러한 수송량은 대부분 도카라 해협(Tokara Strait)을 통해 쿠로시오에 합류한다. 본 연구에서 대마난류의 수송량(1-2 Sv)이 지금까지 다른 연구결과와 달리 작은 값을 갖는 것은 류큐열도의 영향으로 사료된다. 즉 류큐열도가 쿠로시오로부터 동중국해로 유입되는 수송량을 차단하는 역할을 하기 때문이다. 쿠로시오가 일본연안으로 부터 분기되는 위도는 1월에서 9월까지는 약 북위  $37^\circ$ 에서 일어나지만 10월과 11월에는 분기위도가 북상하여 북위  $41^\circ$ 에서 나타나고, 12월에는 다시 북위  $39^\circ$ 로 남하한다(Fig. 2). 이러한 쿠로시오의 분기위도 변화는 해수표면에 적용한 바람응력의 curl 값이 0인 위도와 일치할 것으로 생각되거나 쿠로시오 수송량의 변화와의 관계성을 발견하는 쉽지 않다. 실험 2의 결과(Fig. 3)에서도 대양의 수송량 분포와 대만해협에서의 수송량 분포가 거의 같게 나타

난다.

연해의 순환에 있어서 실험 1과 2는 큰 차이를 보인다. 연해에 바람응력을 적용한 실험 1의 결과(Fig. 2)에 의하면 대만해협을 통해 동해로 유입되는 유선함수의 분포는 강한 북풍계열의 바람응력에 의해 대만해협이 남향류를 갖는 동계(10월-3월)에는 대만 북동부에서 큐슈 남단을 잇는 대륙사면을 따라 흐르다, 큐슈 남서부에 등수심선이 동중국해쪽으로 혀모양으로 만입된 곳의 서쪽 대륙사면을 따라 동중국해로 유입되어, 황해 또는 동해로 유입된다. 대만해협에 북향류가 우세한 하계(4월-9월)에는 대만해협을 통해 유입된 대양수가 동중국해로 유입되어 일부는 중국 동쪽연안을 따라 황해로 유입되어 대만해협을 통해 동해로 유입되며, 그 일부는 일본 큐슈 남서연안을 따라 쿠로시오에 다시 합류한다. 실험 2의 결과(Fig. 3)에서는 실험 1과 달리 쿠로시오로부터 연해로의 분기는 전 계절 모두 대만 남쪽에 위치한 루존해협에서 일어나며, 대만해협을 통해 동해로 유입되는 대양수는 모두 대만해협을 통해 동중국해로 유입되는 대만난류에 그 기원을 두고 있다. 실험 2의 경우 동중국해 및 황해의 유선함수 분포는 potential vorticity 보존 법칙을 만족하도록 등수심선을 따라 분포하고 있다. 이와 같이 실험 1과 2에서 나타나는 연해의 순환과 쿠로시오로부터 대마난류로 분기되는 위치의 차이는 계절풍에 의해 기인된 것으로 나타난다.

#### 3.2 대마난류 수송량의 계절변화

실험 1과 2에서 쿠로시오, 대만해협과 대만해협에서의 월별 수송량 변화를 Fig. 4와 5에 나타내었다. 대만난류의 수송량은, 실험 1의 경우, 7월에 최대, 11월에 최소 수송량을 보이며, 4-9월은 양의 값을 갖는 반면에 1-3월과 10-12월에는 음의 값을 갖는다(Fig. 4). 이러한 음의 수송량 값은 수심이 얇은 황해 및 동중국해에서 동계에 강한 북풍계열의 바람에 의해 중국 연안을 따라 남향류가 형성되기 때문이다. 실험 2의 경우, 실험 1과는 정반대로 하계(7-8월)에 최소수송량을, 동계(12-1월)에 최대수송량이 나타난다(Fig. 5). 이는 쿠로시오의 계절변동에 따라 대만해협의 수송량이 결정되기 때문이다. 실험 1에서 쿠로시오의 월별 수송량변화와 대만해협과의 관계를 살펴보면 쿠로시오 수송량은 1월이 가장 높은 값을 가지며 7월에 가장 낮은 값을 보이는데 반해 대만해협에서

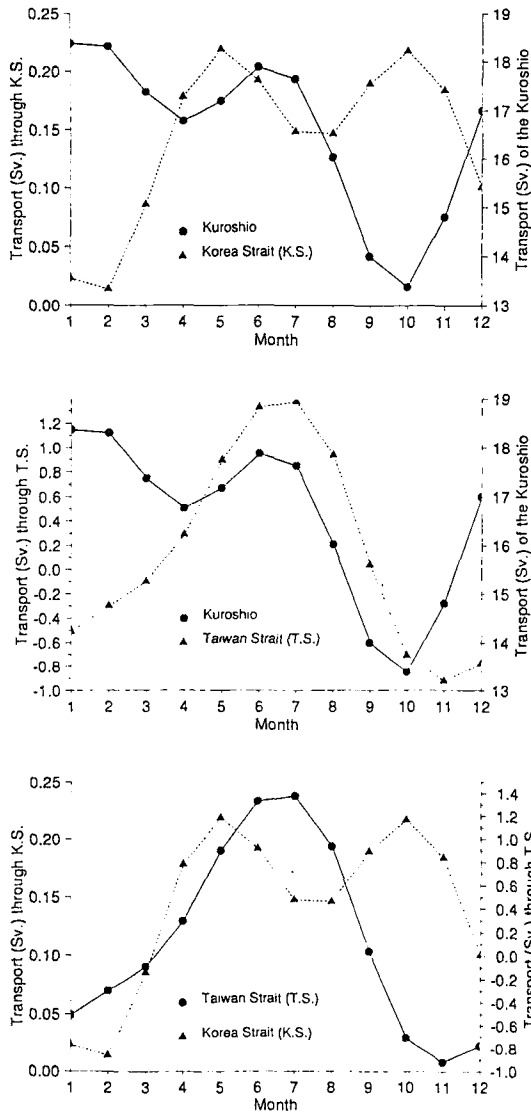


Fig. 4. Variation of transport of Kuroshio, Taiwan Strait and Korea Strait of experiment 1.

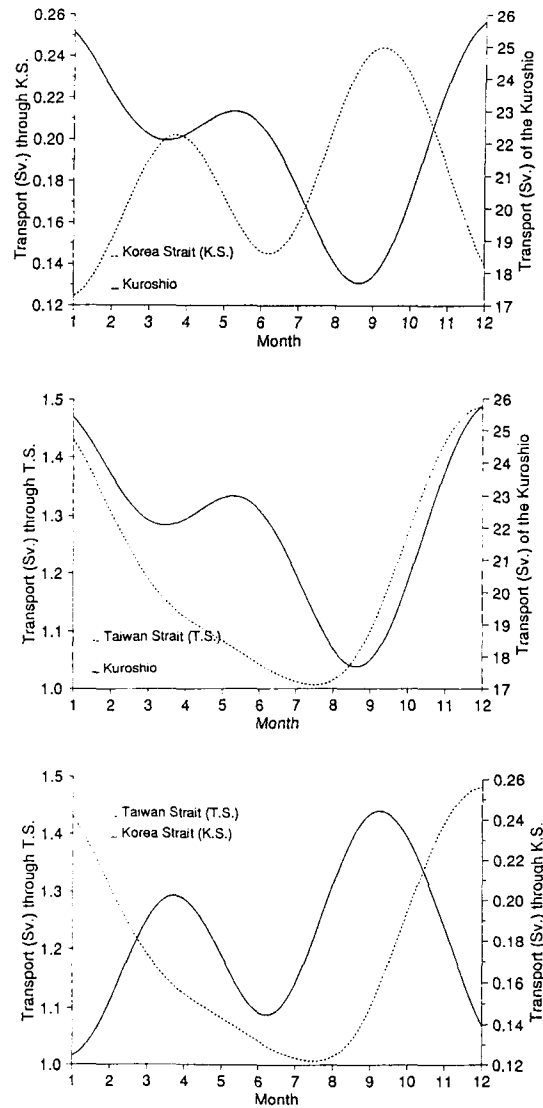


Fig. 5. Variation of transport of Kuroshio, Taiwan Strait and Korea Strait of experiment 2.

가장 낮고 하계에 가장 높은 값을 갖는다. 즉 쿠로시오와 대만해협에서의 수송량 변화는 약 160°의 위상차를 보인다. 이는 Guan(1980, 1983b)의 관측결과와도 잘 일치한다. 실험 2의 경우, 각각의 수송량변화에 있어서 차이를 보이는데, 쿠오시오의 수송량은 실험 1과 거의 같이 겨울에 최대수송량을 가지며 하계에 최소를 보이지만, 최소수송량이 나타나는 시점이 두 실험간에 약 1개월의 차이를 보인다. 이는 Chang (1987) 연구에서도 지적했던 바와 같이 연해에서

순환의 변화가 대양의 순환에도 영향을 미치므로써 일어나는 차이로 사료된다. 대만해협에서 두 실험간에 수송량 변화가 180도의 위상차를 보이는 것은 쿠로시오로 부터 연해로 유입된 해수가 동중국해상에서 계절별 바람에 의해 쿠로시오로 다시 합류되는 수송량의 계절변화에 기인되며 이에 따른 대만류의 분기위치도 같은 변화를 겪는 것으로 사료된다. 대만해협의 수송량 변화는 바람을 적용한 실험 적용하지 않은 실험



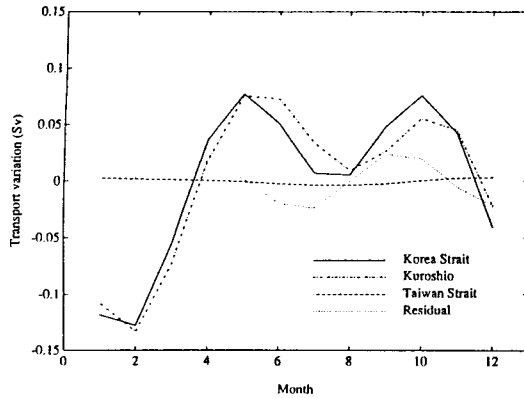


Fig. 6. Contributions of the Kuroshio and the Taiwan Current to the seasonal variation of the Tsushima Current of experiment 1.

차이가 있지만 5월과 10월에 최대수송량을 보이고 동계에 최소값을 갖는 양상을 보인다. 대한해협에서의 수송량과 쿠로시오 및 대만난류의 수송량과의 관계를 보기 위해, 각 지점에서의 평균치를 뺀 연중 수송량의 시계열을 12차원의 벡터로 보고, 대한해협에서의 시계열 벡터  $\vec{K}_o$ 를 다음과 같이 쿠로시오의 시계열 벡터  $\vec{K}_u$  성분과 대만난류의 시계열 벡터  $\vec{T}_a$  성분 및 그 외의 잔차(residual) 성분  $\vec{R}$ 로 분해하였다.  $\vec{k}$ 와  $\vec{l}$ 를 각기  $\vec{K}_u$ 와  $\vec{T}_a$  방향의 단위벡터라고 하면

$$\vec{K}_o = \alpha \vec{k} + \beta \vec{l} + \vec{R} \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 계수이며,  $\vec{R}$ 은  $\vec{k}$ 와  $\vec{l}$ 에 직교인 잔차 벡터이다. 한편  $\vec{k}$ 와  $\vec{l}$ 는 서로 직교하지 않으므로,  $\vec{K}_o$ 를 이들에 의해 스패닝되는 2차원 공간  $span(\vec{k}, \vec{l})$ 에 직각 투영한 후 이들 성분들로 분해하였다. 직각투영자(orthogonal projector)  $P$ 는 다음과 같이 구성할 수 있다 (Golub and Van Loan, 1989).

$$P = VV^T \quad (7)$$

여기서  $V^T$ 는  $V$ 의 전치행렬을 나타낸다. 한편  $V = [\vec{k}, \vec{l}]$ 는  $12 \times 2$  행렬로서 벡터  $\vec{z}$ 는  $\vec{k}$ 에 수직인,  $span(\vec{k}, \vec{l})$  내의 단위벡터로서 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{z} = \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|} \quad \text{여기서 } \vec{r} = \vec{l} - (\vec{l} \cdot \vec{k})\vec{k} \quad (8)$$

$\vec{l}$  시 다음의 관계를 만족한다.

$$P\vec{K}_o = \alpha \vec{k} + \beta \vec{l} \quad (span(\vec{k}, \vec{l}) \text{ 내의 성분}) \quad (9)$$

$$(I - P)\vec{K}_o = \vec{R} \quad (span(\vec{k}, \vec{l}) \text{ 에 직각인 성분}) \quad (10)$$

$I$ 는 단위행렬을 나타내며, 계수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 다음의 식에서 구해진다.

$$\beta = \frac{(P\vec{K}_o) \cdot \vec{l}}{\sqrt{1 - (\vec{k} \cdot \vec{l})^2}},$$

$$\alpha = (P\vec{K}_o) \cdot \vec{k} - \beta \vec{k} \cdot \vec{l} \quad (11)$$

$\vec{K}_o$ 를 분해한 결과는 Fig. 6과 같다. 이러한 분해결과에 의하면 대만난류의 계절별 변화양상은 쿠로시오의 수송량변화와 약 4개월의 시간차를 가질 때 가장 잘 일치하는 양상을 보이며, 그 때 대만난류의 수송량과 잔차(residual)와의 비가 가장 작은 값을 보인다. 여기서 잔차는 계산에 의한 오차가 아닌 지역적 요인에 의해 변형된 성분이다. 즉 대만난류는 대만난류와는 거의 무관하며 대부분 쿠로시오의 계절변동에 지배되는 것으로 나타난다. 그러나 대만난류가 대만난류의 기원으로 나타나는 하계에는 유선함수 분포를 볼 때 대만난류가 대만난류의 영향을 받을 것으로 사료되지만 시계열 자료분석에서 나타나지 않는 것은 다소 다른 점으로 생각된다.

#### 4. 결론 및 토의

대만난류의 분기는 동계(쿠로시오 수송량이 최대)에는 일본 남서부의 대륙사면을 따라 쿠로시오로부터 직접 일어나며, 하계(쿠로시오 수송량이 최소)에는 대만난류가 대만난류의 기원으로 나타난다. 쿠로시오의 수송량 변화는 동계에 최대를 보이고 하계에 최소수송량을 보이는데 이는 CTD 관측으로부터 계산된 수송량의 계절변화와는 다소 다른 결과이다. 이는 본 연구에서 해양이 순압적(barotropic)이라는 가정과 계절별 바람응력만 적용한 결과이기 때문으로 사료된다. 대한해협과 대한해협에서의 계절별 수송량 변화는 두 실험 간에 뚜렷한 차이를 보인다. 연해에 계절별 바람응력을 적용한 결과에서는 동계의 강한 북풍계열의 바람에 의한 대한해협에서의 남향류가 형성되지만, 연해에 바람을 적용하지 않은 실험에서는 항시 북동향류가 나타난다. 그러나 대한해협에서의 수송량 변화는 두 실험간에 절대적 크기에는 차이가 있지만

같은 양상을 보인다. 이는 대마난류가 대부분 쿠로시오의 변동에 지배되며 대만난류와는 무관한 것으로 나타난다. 그러나 대마난류가 대만난류의 영향을 받는 하계에는 동중국해 상에서 지역적 요인(해저지형 및 바람)에 의해 변형된 성분을 보다 상세히 연구해야만 한다고 사료된다. 본 연구결과에 있어서 실제현상과 다소 차이를 보이는 것은 해양을 순압적이라는 가정과 해수표면에 많이 smooth된 바람자료를 이용한 결과로 사료되며, 앞으로는 경압효과를 포함하는 3차원 모델에 보다 실제현상에 가까운 입력자료 및 경계조건을 사용하여 중규모 현상을 재현해야만 이러한 문제점을 개선할 수 있으리라 생각된다.

## 사 사

본 논문은 1994년 한국해양연구소 기본연구사업(PE00446)의 지원으로 연구되었음.

## 參考文獻

- 남수용, 승영호, 1992. 동해해수 유입에 대한 수치모델: 대만난류의 형성 및 수송량. 한국수산학회지, **25**: 58-64.
- 이용재 등, 1993. 쿠로시오해역에서 해황변동연구. 한국해양연구소, BSPN 00179-603-1, 193 pp.
- Beardsley, R.C., Limeburner, R., Yu, H. and Cannon, G.A., 1985. Discharge of the Changjiang into the East China Sea, *Continental Shelf Res.*, **4**, Nos1/2: 57-76.
- Bryan, K. and Cox, M.D., 1972. An approximation equation of state for numerical models of ocean circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **2**: 510-514.
- Chang, K.-I., 1993. The shelfward penetration of western boundary currents. Ph.D. thesis, dept. of oceanography, Southampton University.
- Chao, S.-Y., 1991. Circulation of the East China Sea. A numerical study. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**: 273-295.
- Chen, C.-S. and Wang, J., 1990. On the Kuroshio branch current north of Taiwan, *Acta Oceanographica Taiwanica*, **25**, 55-64.
- Cox, M.D., 1975. A baroclinic numerical model of the world ocean: Preliminary results. In: *Numerical Models of Ocean Circulation*. pp. 107-118, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Cox, M.D., 1984. A primitive equation three-dimensional model of the ocean. Tech. Rep. 1, 250pp., Geophys. Fluid Dyn. Lab., NOAA Princeton Univ., Princeton, N.J.
- Fang, G., Zhao, B. and Zhu, Y., 1991. Water volume transport through the Taiwan strait and the continental shelf of the East China Sea measured with current meters. In: *Oceanography of Asian Marginal Seas*, edited by K. Takano, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 345-358.
- Hsueh, Y., 1992. The intrusion of the Kuroshio across the continental shelf northeast of Taiwan. *J. Geophys. Res.*, **97**(C9), 14323-14330.
- Huh, O.K., 1982. Spring season flow of the Tsushima Current and its separation from the Kuroshio: satellite evidence. *J. Geophys. Res.*, **87**, 9687-9693.
- Golub, G.H. and Van Loan, C.F., 1989. *Matrix Computations*. 2nd Ed. The Johns Hopkins University Press, Maryland, U.S.A.
- Guan, B., 1980. Some results from the study of the variation of the Kuroshio in the East China Sea. The Kuroshio IV-Proc. 4th Symp. Coop. Study Kuroshio Adj. Reg., 879-911.
- Guan, B., 1983b. Analysis of the variations of the volume transport of the Kuroshio in the East China Sea, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **i**(2), 156-165.
- Guan, B., 1986. On the circulation in the East China Sea, *Studia Marina Sinica*, **27**: 1-21.
- Guo, B. and Lin, K., 1987. Characteristics of circulation in the continental shelf area of the East China Sea in winter, *Acta Oceanologica Sinica*, **6**, Supp. I: 51-60.
- Guo, B.K., Lin, H.Z. and Lu, J., 1987. Some features on the circulation in the East China Sea. in "Essays on the Investigation of Kuroshio", Ed. X. Sun, Ocean Press, Beijing. (written in Chinese).
- Hellerman, S. and Rosenstein, M., 1983. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanography*, **13**: 1093-1104.
- Ichiye, T., 1984. Some problems of circulation and hydrography of the Japan Sea and the Tsushima Current. In: *Ocean Hydrographics of the Japan and East China Sea*, edited by T. Ichiye, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 15-54.
- Lim, D.B., 1971. On the origin of the Tsushima Current Water. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **6**: 85-91.
- Minato, S. and Kimura, R., 1980. Volume transport of the Western boundary current penetrating into a marginal sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**: 185-195.
- Moriyasu, S., 1972. The Tsushima Current. In *Kuroshio: Its physical Aspects*, ed. by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. of Washington Press: 353-369.
- Nagata, Y., 1981. Oceanic circulation in the East China Sea. *Proc. Japan-China Study Symp. Kuroshio*, 25-41.
- Nitani, H., 1972. Beginning of the Kuroshio. In *Kuroshio: Its Physical Aspects*, ed. by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. of Tokyo Press. 129-156.
- Qiu, B. and Imasato, N., 1990. A numerical study on the formation of the Kuroshio countercurrent and the Kuroshio branch current in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **10**, 165-184.
- Semtner, A.J., 1974. An oceanic general circulation model with bottom topography. Numerical Simulation of Weather and Climate, Tech. Rep. 9, Dept. of Meteorol., UCLA. 99pp.
- Seung, Y.H. and Nam, S.Y., 1992. A numerical study of the barotropic transport of the Tsushima Current

- Mer.* **30**: 139-147.
- Song, W. and Guo, B., 1991. Summer temperature-salinity distributions and circulation characteristics of the source water of the Tsushima Warm Current, *China J. Oceanol. Limnol.*, **9**(2): 24-32.
- Stommel, H., 1948. The westward intensification of wind-driven currents, *Trans. Amer. Geophys. Un.*, **29**: 202-206.
- Su, J. and Pan, Y., 1987. On the shelf circulation north of Taiwan, *Acta Oceanologica Sinica*, **6**, Supp I: 1-20.
- Takano, K., 1974. A general circulation model for world ocean. Numerical Simulation of Weather and Climate, Tech. Rep. No. 8, Dept. of Meteorol., UCLA, 47pp.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *J. Imp. Fish. Exp. Sta.*, **5**: 57-190.
- Wang, W. and Su, J., 1987. A barotropic model of the Kuroshio system and eddy phenomena in the East China Sea, *Acta Oceanolog. Sinica*, **6**, suppliment, 21-35.
- Yi, S.U., 1966. Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait, *J. Oceanol. Soc., Korea*, **1**: 7-13.
- Yuan, Y., Su, J. and Xia, S., 1987. Three dimensional diagnostic calculation of circulation over the East China Sea shelf, *Acta Oceanologica Sinica*, **6**, Supp. I: 36-50.