

# 동해 해수유입에 대한 수치모델: 대마난류 형성 및 수송량

남수용 · 승영호  
인하대 해양학과

## A Numerical Model on the Inflow into the Japan Sea: the Formation and Transport of the Tsushima Warm Current

Soo-Yong NAM and Yong-Ho SEUNG  
*Department of Oceanography, Inha University,  
Inchön 402-751, Korea*

A barotropic model is run over the Northwest Pacific Ocean to examine the formation and transport of the Tsushima Warm Current. The results indicate that the Tsushima Warm Current is a downstream extension of the Taiwan Warm Current. Local wind does not change the amount of transport of Tsushima Warm Current but it changes much the initial flow pattern of Tsushima Warm Current such that for southerly wind, the transport is through the Taiwan Strait but for northerly wind, it is through the eastern side of Taiwan.

### 서 론

대마난류는 쿠로시오 해류의 지류로 알려져 왔으며 대한해협으로 유입되어 일본 북부해협을 통해 쿠로시오에 다시 합류하며 그 수송량은 1~2Sv 정도로(Moriyasu, 1972; Yi, 1966) 쿠로시오의 수송량(60Sv)에 비해 아주 작은 것으로 알려져 있다. 쿠로시오는 주로 동지나해의 대륙사면을 따라 흐르며 그 일부가 동지나해로 유입되어 동지나해 연안수와 혼합에 의해 대마난류를 형성한다고 믿어왔다.

대마난류는 대륙사면의 경계를 따라 흐르는 쿠로시오와 동지나해 연안수의 혼합수가 넓은 영역에서 북상하여 형성(Lim, 1971; Nagata, 1981)되거나, 일본 큐슈 서쪽 북단의 대륙사면을 넘어오는(그 미커니즘은 밝혀져 있지 않음) 쿠로시오수의

유입으로 형성되거나(Huh, 1982), 혹은 쿠로시오로부터 직접 분기되어 형성될 수 있다는 가능성들이 제시되어 왔다. Guan(1986)은 관측결과를 토대로 쿠로시오가 대만 부근 해역을 통해 동지나해로 유입되어 대만난류를 형성하며 이 해류가 대마난류의 기원일 것이라고 추측하였다. 이는 Guo 등(1987)의 관측결과와도 잘 부합된다. 관측결과에 의하면 대만난류는 남풍이 강한 하계에는 중국과 대만 사이의 대만해협을 통해 형성되며 북풍이 우세한 동계에는 대만 북동부를 통해 흐른다.

본 연구해역에서 해수순환의 미커니즘을 알기 위한 많은 모델 실험이 실행(Hsueh et al., 1986; Wang & Su, 1987)되었으나 대부분 대한해협을 배제하거나 또는 개방경계로 취급함으로써 대마난류의 연구에 부적절하였다.

본 모델에서는 북서태평양을 모델영역으로 하였

부산수산대학 해양과학연구소 연구업적 제 280호(Contribution No. 280 of Institute of Marine Sciences, National Fisheries University of Pusan)

본 논문은 1990년 교육부 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 일부 지원되었음.

고 대마난류의 형성을 고려할 수 있도록 충분히 좁은 격자간격을 사용하였다. 순압적 역학은 쿠로시오가 동지나해로 유입될 때 받는 해저지형의 영향을 이해하는데 용이할 것으로 생각되어 본 연구에서는 순압부분만을 고려하였다. 다시 말하여 본 모델에서는 해저지형의 영향을 극대화시켜 이를 대마난류 형성과 연관시켰다.

### 모 델

모델영역은 쿠로시오 해류계와 주변 해류계를 포함하는 해역으로 북위 15°~43°, 동경 117°~150°에 이르는 북서 태평양과 그 주변해인 황해, 동해 그리고 동지나해를 포함하는 지역이다. 특히 대만 동북부와 일본 큐슈 남단을 잇는 200~500m 등수심선을 경계로 대부분 지역이 수심 4,000m 이심인 대양부와 대략 100m 수심을 갖는 연해지역으로 크게 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 실제 해양에서 경압효과를 고려하였을 때의 적정 순압류 수심

(쿠로시오 수심, He)을 300m로 일정하게 하였다 (그림 1).

본 연구에 사용된 모델은 구좌표계를 사용한 Semtner(1974)의 GCM중 순압부분으로 그 지배방정식은 운동방정식과 연속방정식이다.

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

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

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho_0 g \quad (3)$$

- 여기서  $\vec{V}$  : 속도 수평성분 벡터
- $\rho_0$  : 해수 평균밀도 ( $1.0g/cm^3$ )
- $A_m$  : 와동 점성계수 ( $10^7 cm^2/sec$ )
- $f = f_0 + \beta y$ :  $\beta$ 면상의 코리올리 변수
- $\vec{K}$  : 수직상 방향 단위벡터
- $\vec{\tau}$  : 바람응력 벡터
- $C_D$  : 해저 마찰계수 (0.002)
- H : 수심

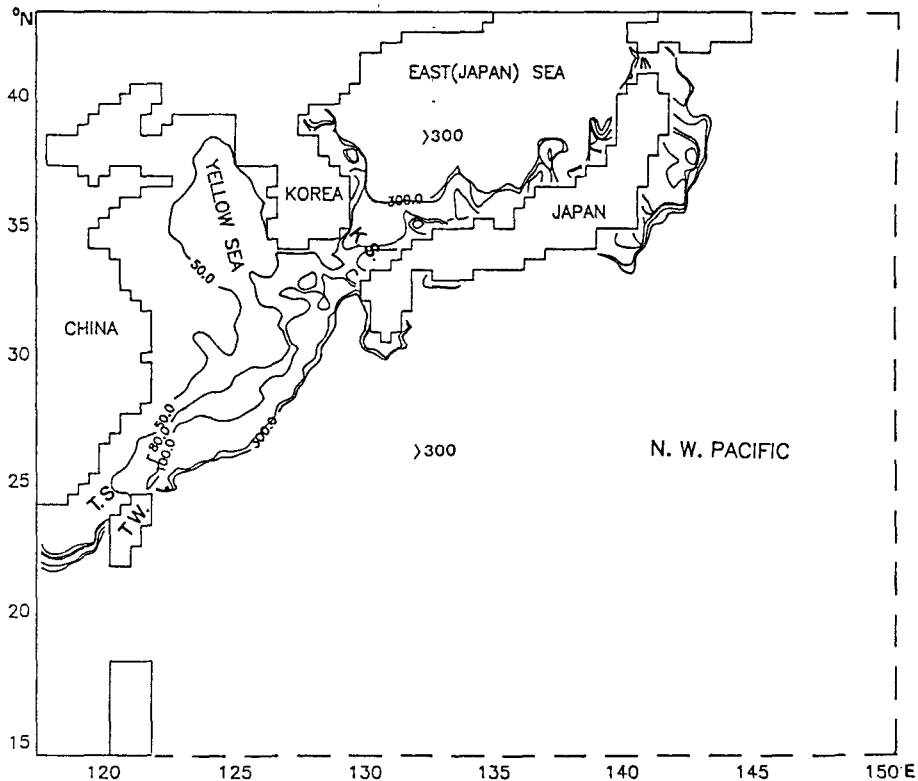


Fig. 1. Model domain with bottom topography (depth in meter). Solid lines are closed boundaries and dotted lines are ocean boundaries. T. W. means Taiwan. K. S. and T. S. mean Korea and Taiwan Straits, respectively.

$g$  : 중력 가속도

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

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

여기서  $\lambda, \phi$  : 좌표계에서 경도와 위도

$u, v$  :  $\lambda, \phi$  방향의 속도성분

$a$  : 지구반경

(1)식에 curl을 취한 후 (4)식을 이용하면 유선함수로 표시된 와도방정식을 얻는다(Semtner, 식(21) 참조). 해수표면은 rigid lid로 가정하였고 해저면에는 quadratic 형태의 해저마찰을 적용하였다. 모델영역이 아열대 순환(Subtropical Gyre)의 서쪽 부분에 해당하므로 동경 150°에 주어진 개방 경계 조건은 Stommel(1948)의 해와 같게 다음과 같이 주었다.

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

여기서  $L$ 은 남북방향으로의 모델크기이고  $y(=a\phi)$ 는 남쪽경계에서부터 북쪽방향의 위치를 나타내고  $\Psi_{MAX}$ 는 쿠로시오의 최대수송량으로 60Sv으로 하였다(Nitani, 1972). 해안선을 따라서 육지와 접한 경계에는 no-slip 조건을 적용하였고 동경 122°~150°에 이르는 남쪽경계와 동경 145°~150°까지의 북쪽경계(Subtropical Gyre의 남북경계)에는 slip 조건을 부여하였다. 격자구성은 Arakawa(1966)의 B-Grid를 사용하였고 섬에서 유선함수(stream function) 값을 얻기 위해 Hole relaxation 방법(Takano, 1974)을 사용하였다. 150일 동안 시간적분하여 정상상태의 해를 구하였다(예, 바람이 없는 경우, 그림 2). 계절풍의 영향을 보기 위하여 바람응력이 1dyne/cm<sup>2</sup>로 일정한 남풍과 북풍을 적용한 경우에도 실험을 하였다.

## 결 과

### 1. 대만난류의 형성

바람을 적용하지 않은 실험에서 유선함수 분포는 그림 3과 같다. 북서태평양에는 서안경계류(쿠로시오)가 형성되며 그 일부가 대만의 동측연안이나 대만해협을 대륙사면을 가로질러 대륙붕으로 수송된 후 대륙붕 상에서 등수심선을 따라 흐르다 대한해협을 통해 동해로 유입된다. 대만 부근에서

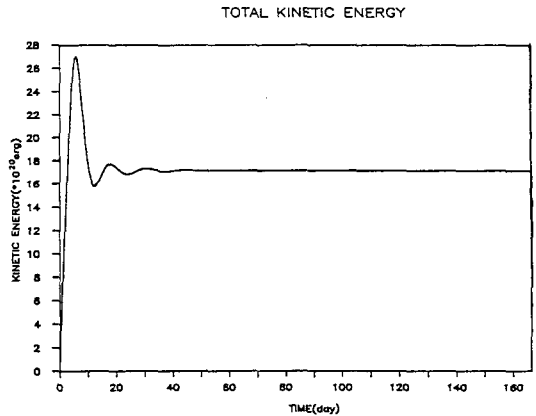


Fig. 2. Time variation of total kinetic energy in case of no wind.

의 유선함수 분포는 쿠로시오로부터 형성된다고 알려진 대만난류와 같다(Guo et al., 1987). 이러한 유선분포에 의하면 대만난류는 대만난류의 확장에 의해 형성되는 것으로 사료된다. 대만난류의 수송량은 0.43Sv으로 일반적으로 알려진 수송량 1~2Sv (Moriyasu, 1972; Yi, 1966)보다 매우 작은 값이다. 이는 본 모델이 경압효과를 고려하지 않은데 그 이유가 있다고 사료된다. 이 결과에 의하면 쿠로시오수는 대륙사면의 남단(즉 대만부근)을 통해 동지나해로 유입된다. 한편 대륙사면 북단(일본 큐슈 연안)을 통한 쿠로시오수의 북상은 나타나지 않는다.

### 2. 계절풍의 영향

본 모델영역에서 년중 평균 바람방향은 북서풍이며 겨울에는 북풍계열이 우세하고 여름에는 남풍계열이 지배적이며 평균 바람응력( $\tau$ )은 0.5dyne/cm<sup>2</sup>이라고 보고된 바(Legler and O'brien, 1984)는 있지만, 아직까지 정확히 실측된 바람응력 및 방향은 알려져 있지 않다. 바람응력이 1dyne/cm<sup>2</sup>인 남풍이 불었을 경우 대만난류수는 주로 대만해협을 통해 수송되며(그림 4) 같은 세기의 북풍이 불 경우는 대만 동측을 통하여 수송되는 것으로 나타난다(그림 5). 그러나 대한해협을 통하는 총 대만난류 수송량은 모든 경우에 0.43Sv으로 일정하다.

쿠로시오 주류의 유선분포는 바람방향에 거의 무관하게 분포하고 있지만 쿠로시오의 지류가 동지나해로 유입되는 경로는 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 북풍이 불 때는 대만해협을 통과하는 유량은 격감하고 쿠로시오 지류는 주로 대만 동북부를 통해 동지나해로 연결되지만, 남풍이 우세한 경우에

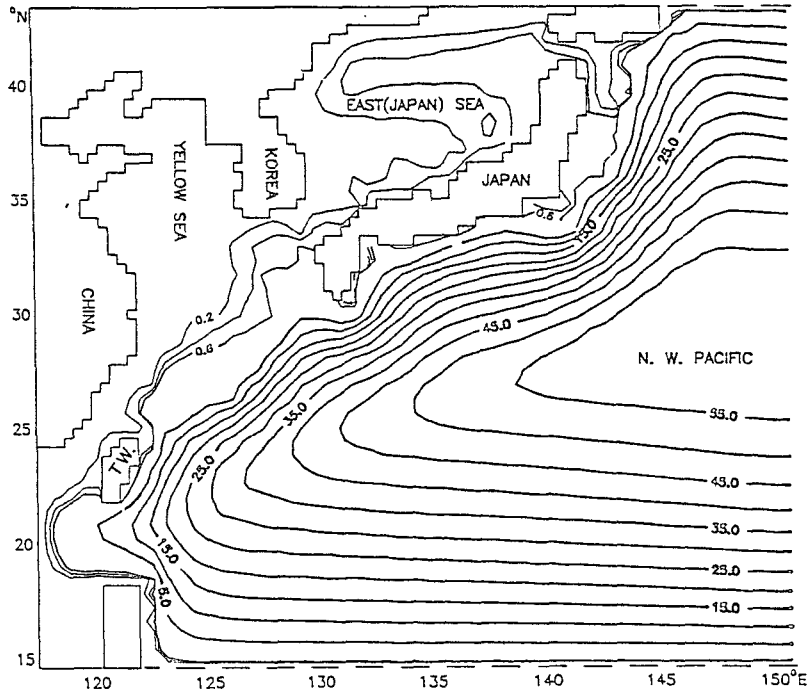


Fig. 3. Distribution of transport stream function(in Sv.) in case of no wind. Thick lines are for interval of 5 Sv and thin lines are for interval of 0.2 Sv.

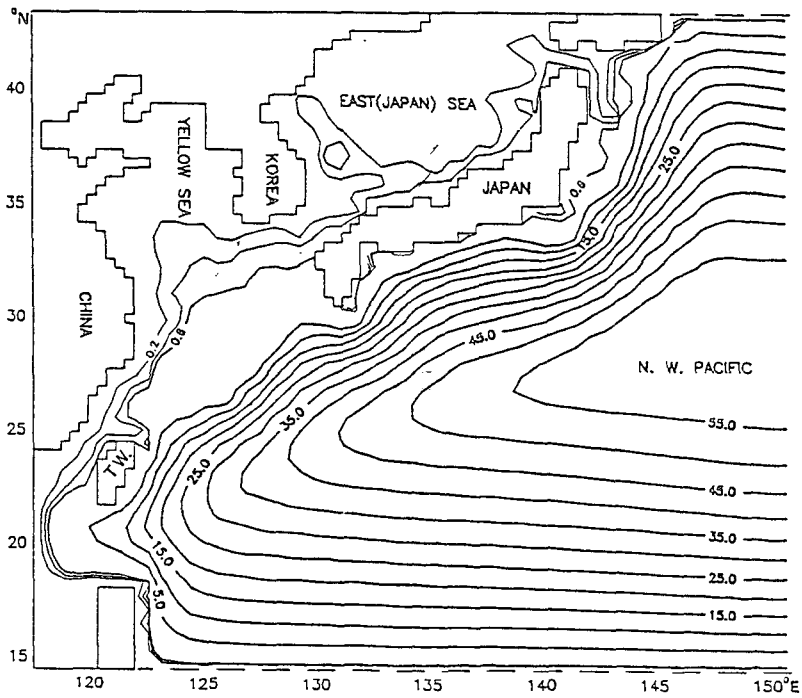


Fig. 4. Distributions of transport stream function in case of southerly wind. Thick lines are for interval of 5 Sv and thin lines are for interval of 0.2 Sv.

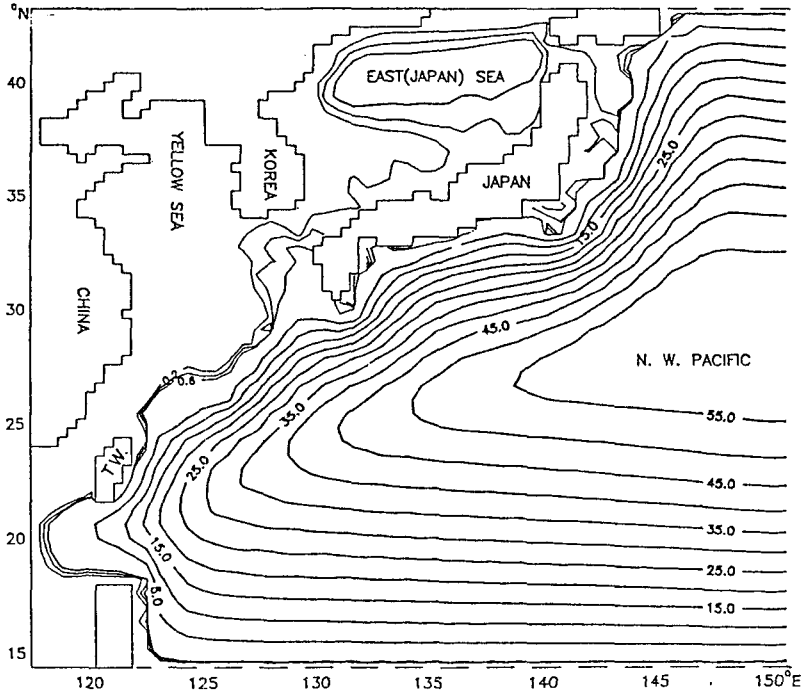


Fig. 5. Distributions of transport stream function in case of northerly wind. Thick lines are for interval of 5 Sv and thin lines are for interval of 0.2 Sv.

는 대부분 대만해협을 통해 동지나해로 연결된다. 유입된 쿠로시오수는 등수심선을 따라 흐르며 대마난류를 형성한다.

### 3. 운동량 균형

대마난류의 형성 미커니즘을 보다 명확히 하기 위하여 쿠로시오와 대마난류를 대표하는 유선상에서 유선함수의 접선방향(along stream component)과 수직방향(cross stream component)으로의 힘의 균형을 조사하였다.

바람을 적용하지 않은 경우에 쿠로시오 해류의 주축상(유선함수 30Sv)에서 축에 수직한 방향의 힘의 균형은 압력경도력과 전향력이 균형을 이루고 있으며(지형류) 접선방향으로는 주로 압력경도력과 마찰력이 균형을 이루고 있다(그림 6). 이것은 서안경계류를 설명한 Stommel(1948)의 선형 모델결과와 같다. 대마난류의 주축(유선함수 0.4Sv)을 따라서 축에 평행, 수직한 방향의 힘의 균형도 쿠로시오에서의 그것과 같다(그림 7). 접선방향의 균형에서 작용하는 마찰력은 주로 해저마찰력이나 연안 부근에서는 점성마찰이 더 크게 나타난다.

### 결론 및 토의

해저지형을 갖는 순압모델에 의한 실험결과에 의하면 대마난류는 대만난류의 확장이며 일본 남서연안을 따라 북상하는 쿠로시오의 지류는 없는 것으로 나타난다. 오히려 대만 부근을 통하여 동지나해로 유입된 쿠로시오수의 일부가 이 곳에서 다시 쿠로시오 본류와 합류되는 듯하다. 대만해협 또는 대만 북동부를 통해 유입되는 수송량은 계절풍의 영향에 따라 좌우되지만(변화폭은 대략 0.8Sv) 대한해협에서의 수송량은 거의 변화가 없다. 대만난류는 여름(남풍시)에는 주로 대만해협으로 그리고 겨울(북풍시)에는 대만 북동부를 통해 유입된다. 대마난류나 대만난류는 지형류라고 볼 수 있으며 흐름 방향으로는 압력경도력과 마찰력(외해에서는 해저마찰, 연안에서는 점성마찰)이 평형을 이루는 것으로 나타난다.

본 연구는 순압모델을 사용함으로써 경압효과에 의한 영향을 살펴 볼 수 없었으며 중국의 양쯔강 및 황하강으로 부터 유입되는 담수의 영향도 고려하지 못했기 때문에 정확한 결과일 수는 없으나

대마난류의 형성에 대한 이해를 증진시킬 수 있는  
 이라 사료된다.

사 사

본 논문은 1990년도 교육부 기초과학 육성 연구  
 비 및 교육부 자유공모과제 학술연구 조성비의 지  
 원에 의하여 연구되었음. 본 논문을 심사하여 유익  
 한 조언을 해준 심사자께 감사드립니다.

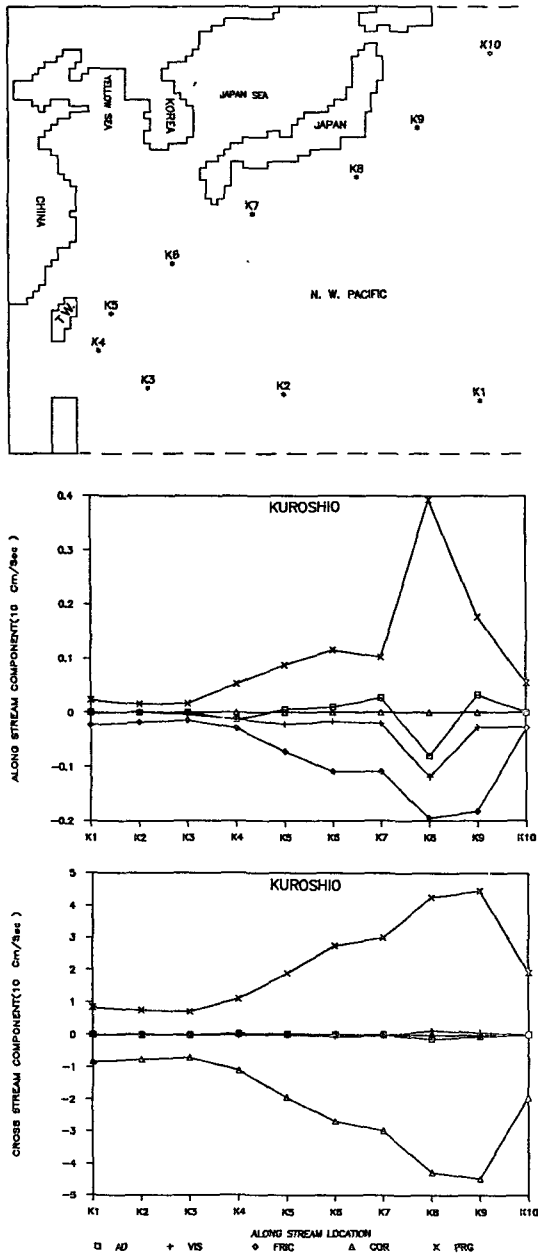


Fig. 6. Momentum balance of cross- and along-stream component along the Kuroshio main axis in case of no wind. AD, VIS, FRIC, COR and PRG denote advection, viscosity, bottom friction, coriolis, and pressure gradient forces, respectively.

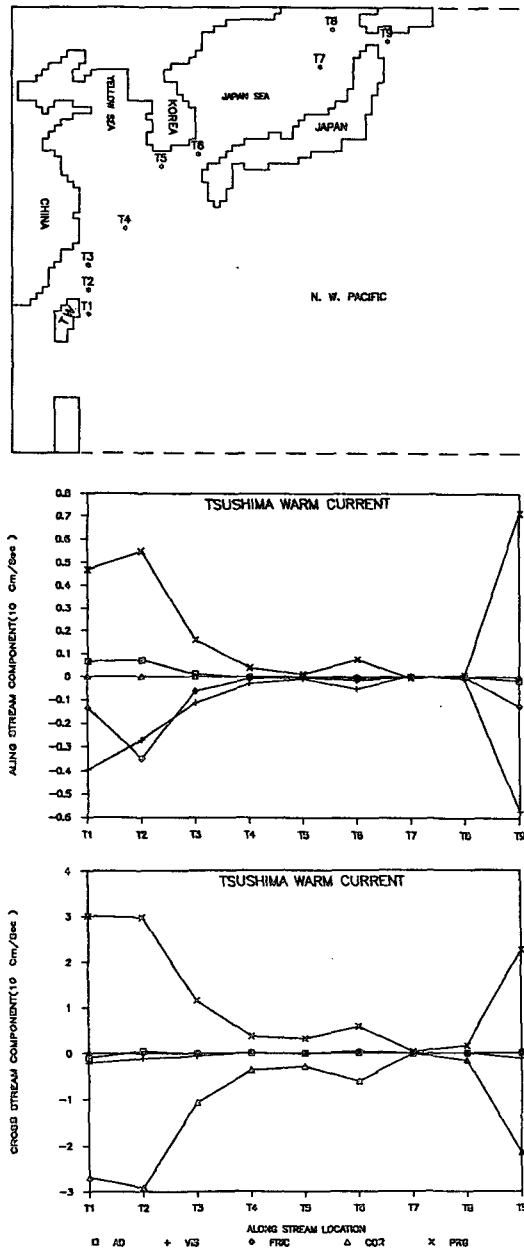


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for along the Tsushima main axis.

## 요 약

북서 태평양에 순압모형을 적용하여 대마난류의 형성과 수송량을 살펴보았다. 모델결과는 대마난류가 대만 부근에서 형성되는 대만난류의 연장임을 보여주고 있다. 계절풍은 대마난류의 수송량 변화에는 그 영향이 미약하지만 대마난류의 유입경로에는 커다란 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉 쿠로시오의 지류가 동지나해로 유입되는 경로가 남풍시는 주로 대만해협으로, 북풍시는 대만 동부를 통해 유입되는 것으로 나타난다.

## 참 고 문 헌

- Arakawa, A. 1966. Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion. *J. Comput. Phys.*, 1, 119~143.
- Chao, S. -Y. 1991. Circulation of the East China Sea, A Numerical Study. *J. Oceanol. Soc. Japan*, 46, 273~295.
- Guan, B. 1986. On the Circulation in the East China Sea. *Studia Marina Sinica*, 27, 1~21.
- Guo, B. K., Lin, H. Z. and J. Lu. 1987. Some features on the circulation in the East China Sea. In: *Essays on the Investigation of Kuroshio*, X. Sun, editor, Ocean Press, Beijing. (in China)
- Hsueh, Y., R. D. Romea and P. W. Dewitt. 1986. Wintertime winds and coastal sea level fluctuations in the northeast China Sea. Part III: Numerical model. *J. Phys. Oceanog.*, 16, 241~261.
- Huh, L. K. 1982. Spring season flow of the Tsushima Current and its separation from the Kuroshio: satellite evidence, *J. Geophys. Res.*, 87c, 12, 9687~9693.
- Legler, D. M. and J. J. O'brien. 1984. Atlas of tropical Pacific wind-stress climatology 1971~1980. The Florida State Univ., 182pp.
- Lim, D. B. 1971. On the origin on the Tsushima Current Water. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 6, 85~91.
- Moriyasu, S. 1972. The Tsushima Current. In: *Kuroshio: Its Physical Aspects*, H. Stommel and K. Yoshida, editors, University of Tokyo 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*, H. Stommel and K. Yoshida, editors, University of Tokyo Press, 129~156.
- Semtner, A. J. 1974. An oceanic general circulation model with bottom topography: Numerical Simulation of Weather and Climate, Technical Report No. 9, Department of Meteorology, UCLA, 99pp.
- Stommel, H. 1948. The westward intensification of wind-driven currents. *Trans. Amer. Geophys. Un.*, 29, 202~206.
- Takano, K. 1974. A general circulation model for world ocean. Numerical simulation of Weather and Climate, Technical Reprt No. 8, Department of Meteorology, UCLA, 47pp.
- Wang, W. and Jilan Su. 1987. A barotropic model of the Kuroshio system and eddy phenomena in the East China Sea. *Acta Ocean 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.

---

1991년 11월 11일 접수

1991년 1월 9일 수리