

## 동중국해역에서 양자강 유출량 변화에 따른 저염확산 수치실험

황재동 · 조규대\* · 정희동 · 박성은\*\*

국립수산과학원 해양연구과 \*부경대학교 해양학과 \*\*부경대학교 산업개발연구소

# Numerical Experiment of Low Salinity Due to the Variation of Yangtze River Discharge in East China Sea

Jae Dong Hwang · Kyu Dae Cho\* · Hee Dong Jeong · Sung Eun Park\*\*

Oceanography Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-902, Korea

\*Dept. of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

\*\*Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**요 약** : 한반도 서남부해역은 하계 양자강의 유출에 의해 저염분 현상이 발생한다. 중국 大通(Datong)에서 지난 65년(1922-1986)간 장기관측한 자료에 의하면 매년 양자강 유출량은 일정하지 않으며, 최대 유출량은 최소유출량의 2배 이상이 됨을 보여주고 있다. 따라서 양자강의 유출량을 달리하여 저염확산을 수치모델로 연구하고자 하였다. 수치모델은 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하였다. POM은 연직적으로  $\sigma$ -좌표계를 사용하는 3차원 해양순환모델이다. 모델 수행 후 연구해역내 대륙사면에서 유속이 강하게 나타났다. 또한 제주도 서쪽을 통해 북상하여 황해중앙부로 들어가는 흐름이 있으며, 대륙연안을 따라 남하하는 흐름이 있음을 알 수 있다. 양자강 유출량을 부여한 후 수행한 모델의 결과를 보면 양자강 유출량이 많을수록 저염분역이 제주도에 가깝게 나타남을 알 수 있다.

**핵심용어** : 동중국해, 수치모델, 저염분

**Abstract** : Low salinity water appears by outflow of fresh water from the Yangtze River in southwestern sea of the Korean peninsula. The water volume discharged from the Yangtze River is not constant with year, according to the time series data recorded in the past, the maximum value of the discharged volume is two times as high as minimum value. Therefore, the distribution of low salinity water over study area with different discharged fresh water volume is studied using numerical model, Princeton Ocean Model (POM). POM is three dimensional circulation model selecting a  $\sigma$ -coordinate. According to the result of numerical simulation by the Model, current velocity on the continental slope is faster than those in other regions, current which flows toward the central part of the Yellow Sea through western part of Jeju exists, and also, southward flow along the coastal region exists. the greater discharged volume from the Yangtze River is, the lower salinity water appears closer to Jeju.

**Key words** : East China Sea, Numerical model, Low-salinity

### 1. 서론

양자강 유출에 관한 수치실험을 위한 대상해역은 황해, 남해 및 동중국해를 포함한 해역이며 하계 저염분이 나타나는 해역이다. 황해는 한반도와 중국대륙에 둘러싸여 있는 반폐쇄적인 형태를 지닌 해역으로 평균수심 44m이며, 최대수심은 100m 이내의 천해이다. 남해는 동중국해의 연장으로 평균수심은 101m, 최대수심은 227m로 대한해협에서 나타난다. 동중국해는 중국 중앙부 연안의 동쪽에 위치하고 있으며 북으로 황해와 접하고 있고, 대한해협에 의해 동해와 구분되며 평균수심은 349m 이며 (柳, 1994; 이석, 2000, 국립수산진흥원, 2001),

최고수심은 오가나와 해분(Okinawa Trough)으로 수심 2000m 이상이고, 대만과 일본을 연결한 선을 따라 대륙사면(Continental slope)이 발달되어 있다 (Fig. 1).

연구해역내의 해류는 대만과 Yonaguni-jima(Ryuku Island의 최남서단에 있는 섬) 사이로 들어오는 쿠로시오(Kuroshio)와 남중국해로부터 대만해협을 통해 들어오는 대만난류가 직접적인 영향을 미친다 (Isobe, 1999; Naimie *et al.*, 2001; Lee and Chao, 2003; Teague *et al.*, 2003).

또한 주변 육지의 하천으로부터 연간 약 1,200km<sup>3</sup>정도의 담수가 유입되고 있으며, 그 중 중국대륙에 기원을 둔 양자강의 연간 유출량이 950km<sup>3</sup>정도로 전체 유입량의 79%를 차지한다. 양자강 이외에도 70여개의 크고 작은 하천이 있는데 그 중 황

하와 압록강(Yalu river)의 연간 유출량이 각각  $42\text{km}^3$ ,  $35\text{km}^3$  정도로 연구해역으로 유입되는 전체 유입량의 3.5%와 2.9%를 차지한다 (柳, 1994).

연구해역은 하계 양자강에 의해 많은 양의 담수가 해수로 유출되어 매년 저염분 현상이 발생하며, 특히 1996년은 저염분현상이 강하게 나타난 해이기도 하다 (국립수산과학원 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003). 양자강 유출량은 매년 다르므로 (柳, 1994; Global runoff data Center) 본 연구에서는 양자강에서 유출된 담수량에 차이를 두어 저염분 확산을 수치 모델을 이용하여 연구하고자 하였다.

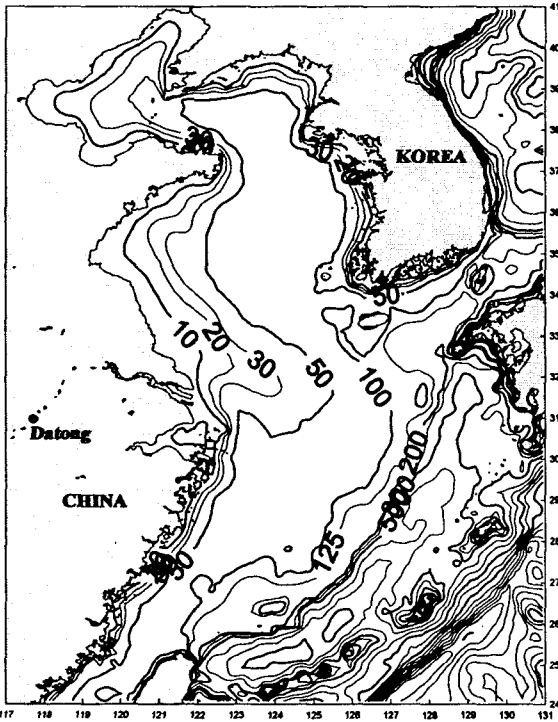


Fig. 1. Topography in the study area (unit: m).

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자료

수치모델에 필요한 수심자료는 National Geophysical Data Center(NGDC)에서 제공하는 경위도 각각 5분 간격으로 격자화된 수심자료인 ETOPO5 자료 (<http://www.ngdc.noaa.gov/cgi-bin/mgg/seltopo>)를 이용하였다. 이 수심 자료를 이용하여 수치모델의 격자간격과 같이 경위도 10분 간격의 수심자료로 재구성하였다. 그러나 ETOPO5 자료는 연안부근에서 잘 맞지 않기 때문에 국립해양조사원에서 발간한 해도 No. S-836을 사용하여 연안부근에서의 수심을 보정하였다 (Fig. 1).

양자강 유출량은 중국 大通(Datong)에서 지난 65년간 (1922-1986) 관측한 양자강의 유출량 자료 (Global Runoff data Center)중 하계 유출량에 해당하는 7월의 값들 중 최대

값인  $75200\text{ m}^3/\text{s}$ , 평균값인  $49266\text{ m}^3/\text{s}$  및 최소값인  $32800\text{ m}^3/\text{s}$ 을 사용하였으며 (Fig. 2), 개방경계에서 해류의 수송량은 Lee and Chao (2003)에 의해 제시된 하계에 해당하는 7월의 값을 사용하였다 (Table 1).

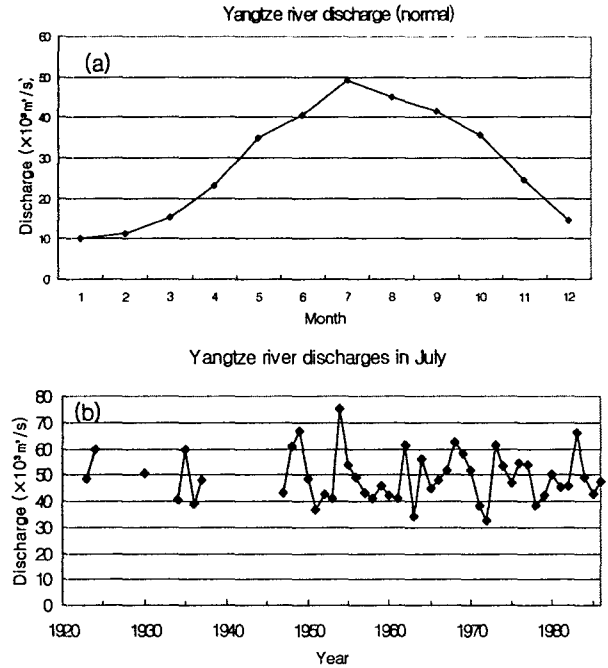


Fig. 2. Numerical monthly variation (a) and long term summer variation for 65 years (b) in river discharge from Yangtze.

Table 1. Monthly transport(unit:  $\times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ ) through open boundaries (After Lee and Chao, 2003)

Taiven Strait	0.5	0.5	1.5	1.5	2.2	2.3	2.3	2.4	1.5	0.5	0.5
Kushin Inflow	22.0	22.0	22.3	23.0	24.0	23.5	23.0	23.0	22.0	21.0	22.0
Kushin outflow	-20.24	-20.62	-22.27	-22.63	-23.95	-23.04	-22.53	-26.74	-25.39	-19.83	-19.72
Taishin Strait	-2.27	-1.89	-1.75	-1.89	-2.28	-2.00	-3.32	-3.71	-3.85	-3.71	-3.33
Yangtze	0.010	0.013	0.016	0.023	0.037	0.042	0.050	0.045	0.043	0.037	0.025

Positive and Negative values are for inflow and outflow, respectively.

### 2.2 방법

연구해역에 3차원 해양순환모델 (Blumberg and Mellor, 1987)인 Princeton Ocean Model(POM)을 사용하여 수치실험을 하였다. 직각좌표계는 각 층의 두께를 일정하게 고정하여 사용하므로 여러층으로 나누어도 수심이 얇은 곳에서는 거의 1개의 층으로 나타나기 때문에 유속의 수심변화를 제대로 고려하지 못한다는 단점이 있다. POM은 연직적으로 수심에 대해  $\sigma$ -좌표계를 사용하므로 해저지형의 경사가 급한 곳에서 해수유동을 재현하기에 다소 단점을 내포하고 있는 직각좌표계 (Mellor *et al.* 2002)를 보완하였다. 따라서 직각좌표계의 형태로 표현되는 기본방정식들을 식(1)을 사용하여  $\sigma$ -좌표계로 변환시켰다 (Phillips, 1957; Blumberg and Mellor, 1980; 1987).

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad t^* = t \quad (1)$$

여기서  $x, y, z$ 는 직각좌표계에서의 수평, 연직성분을 나타내며,  $H$ 는 수심을  $\eta$ 은 해면변위를 나타낸다. 또한 시간에 따른 해면변위를 고려한 자유표면조건을 만족하도록  $H + \eta = D$ 로 두었다.  $\sigma$ -좌표계로 변환시킨 후 기본방정식은 식 (2), (3), (4), (5), (6), (7) 및 (8)이 된다.

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma-1}^{\sigma} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma' = -\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma-1}^{\sigma} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma' = -\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SYD}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (6)$$

여기서  $D$ 는 해면변위를 고려한 총 수심으로  $H + \eta$ 가 되며,  $f$ 는 편향력,  $T$ 는 수온,  $S$ 는 염분을 나타내며,  $F_x, F_y, F_T$  및  $F_S$ 는 수평 확산 및 점성항이다.  $\omega$ 는  $\sigma$ -좌표계에서의 연직유속으로  $\omega$ 는 식 (7)를 사용하여 직각좌표계에서의 연직유속으로 변환시킬 수 있다.

$$w = \omega + U \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (7)$$

수평공간차분은 양해법(explicit)을 사용하였다. 따라서 계산시간 간격은 식 (8)과 같은 안정조건인 C-F-L (Courant-Friedrichs-Levy) 조건에 의해 제한된다 (Blumberg and Mellor, 1981).

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_t} \left| \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right|^{-1/2} \quad (8)$$

여기서  $C_t = 2(gH)^{1/2}$ 이며,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심을 나타낸다.

본 연구에서의 시간간격은 C-F-L 조건을 만족시키는 30초를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

중국 大通(Datong)에서 지난 65년간 관측한 양자강 유출수의 자료에 의하면 하계 양자강 유출수는 해마다 다름을 알 수 있다. 최대유출량이 발생했던 시기는 1954년이며 유출량은 75200 m<sup>3</sup>/s이었으며, 최소유출량은 1972년에 32800 m<sup>3</sup>/s를 기록하였으며, 최대값과 최소값의 편차는 42400 m<sup>3</sup>/s이었다.

수치모델에 의한 시뮬레이션을 수행함에 있어 연구해역내의 유동장이 안정화될 때까지 370일 정도는 양자강 유출수를 고려하지 않았으며, 370일 이후에 양자강 유출량을 고려하여 30일을 계산하였다.

연구해역내 수치모델 계산 후 유동장을 보면 대만에서 일본을 연결한 대륙사면부를 따라 강한 흐름이 존재하였다. 이는 대만 동쪽으로 유입된 강한 쿠로시오 난류의 영향을 반영하였다. 유향은 등수심선과 거의 평행하게 타나났으며, 제주도 서쪽을 통해 황해내부로 유입되는 흐름이 나타났다. 황해 내부로 들어간 흐름은 중국연안보다는 한국연안에 접근하여 북상하며 발해만까지 유입됨을 알 수 있다. 또한 중국연안과 한국 서해안을 따라 남하하는 흐름이 나타났으며, 한국서해안을 따라 남하하는 흐름과 제주도 서쪽에서 일부 흐름이 제주해협을 지나 한국 남해안으로 유입되었다. 또한 양자강 동쪽해역에 반시계 방향의 흐름이 나타났다 (Fig. 3).

양자강 유출량 적용에 있어 최소값, 평균값 및 최대값을 산정한 경우의 결과를 Fig. 4(a), (b) 및 (c)에 나타내었다. 30일 이후의 염분분포를 보면 3가지 경우 모두 저염분역이 황해입구로 유입됨을 보였다. 이는 제주도 서쪽에서 북상하는 흐름의 영향을 나타내고 있다. 그러나 저염역의 분포와 세기에는 차이를 보였는데, 양자강 유출량이 최소일 경우에는 양자강 동쪽해역에 강한 저염역이 나타났다. 양자강 유출량이 65년간 7월 평균일 경우 20psu 영역이 최소일 경우에 비해 다소 동쪽으로 확장해 있으며, 동쪽끝에서 북쪽으로 확장하려는 현상을 보였다. 양자강 유출량이 최대일 경우에는 제주도 서쪽 해역에서 20psu 영역이 나타났으며 저염역의 분포영역도 넓게 나타났다. 따라서 양자강 유출량이 많을수록 저염역의 영역이 넓었으며, 세기도 강하였다. 또한 3가지 경우 모두 양자강 남쪽의 중국연안에 저염역이 나타나는데 이는 양자강 유출수가 지구자전에 의한 편향력을 받아 중국연안으로 치우쳐 있음을 알 수 있다.

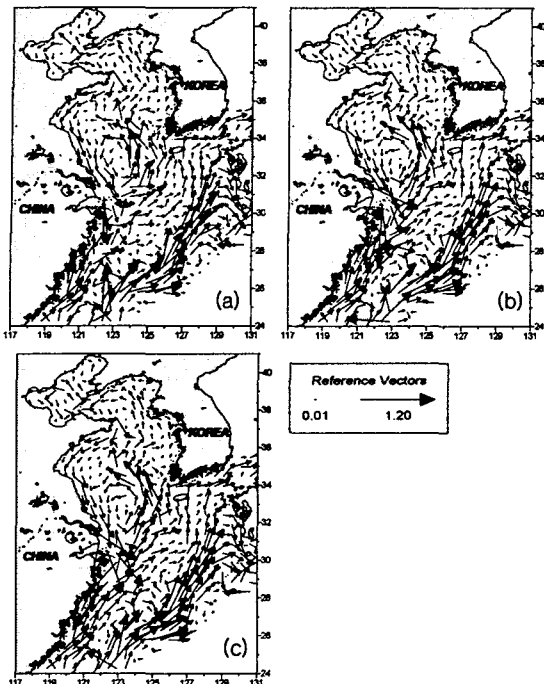


Fig. 3. Surface currents derived from numerical simulation in case of maximum (a), mean (b), minimum discharge of Yangtze river.

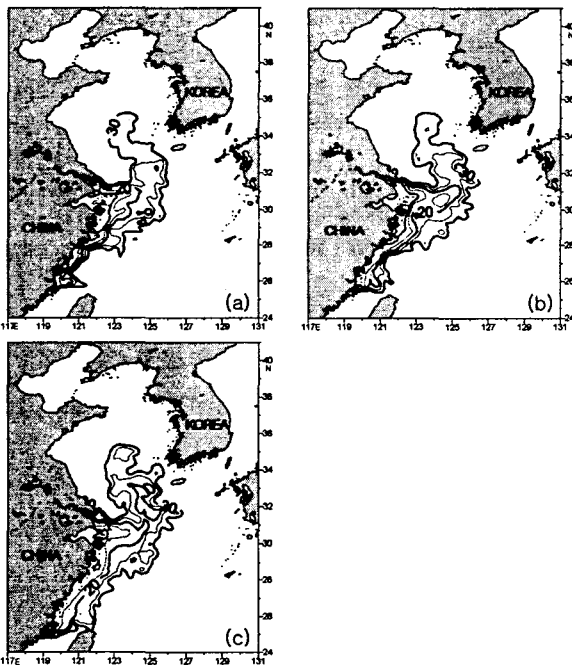


Fig. 4. Horizontal distribution of low-salinity water over study area in case of maximum (a) mean (b), minimum discharge (c) of Yangtze river.

#### 4. 결 론

수치모델 수행 후 유동의 결과를 보면 대륙사면에서 강한 유속이 나타났다. 유향은 등수심을 따라 거의 평행하게 나타났으며, 제주도 서쪽에서 황해내부로 유입되는 흐름이 나타났다. 또한 중국연안과 한국서해안을 따라 남하하는 흐름이 나타났다. 비록 3가지 경우 모두 저염역의 황해유입이 보일지라도 양자강 유출량에 따라 연구해역내의 저염역의 영역과 세기가 다르게 나타났다.

#### 참고문헌

- [1] 국립수산진흥원, 1997. 한국근해 해양정보.
- [2] 국립수산진흥원, 1998. 한국근해 해양정보.
- [3] 국립수산진흥원, 1999. 한국근해 해양정보.
- [4] 국립수산진흥원, 2000. 한국근해 해양정보.
- [5] 국립수산진흥원, 2001. 한국근해 해양정보.
- [6] 국립수산진흥원, 2001. 한국해양편람 제4판.
- [7] 국립수산과학원, 2002. 한국근해 해양정보.
- [8] 국립수산과학원, 2003. 한국근해 해양정보.
- [9] 이석, 2000. 황·동중국해에서의 조류특성과 조석의 계절 변동성 연구. 박사학위논문. 성균관대학교 토목환경공학과. pp190.
- [10] 柳哲雄, 1994. Material Transport in the Yellow/East China Seas. 沿岸海洋 研究ノート, 第31卷, 第2号. p239-256.
- [11] Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N. Heaps (Editor), Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Vol. 4, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 1-16.
- [12] Ezer, T., H. Arango and A. F. Shchepetkin, 2002. Developments in terrain-following ocean models: intercomparison of numerical aspects, Ocean Modelling, 4, 249-267.
- [13] Isobe, A., 1999. On the origin of the Tsushima warm current and its seasonality. Continental Shelf Research, 19, 117-133.
- [14] Lee, H.-J. and S.-Y. Chao, 2003. A climatological description of circulation in and around the East China Sea. Deep-Sea Research II 50, 1065-1084.
- [15] Mellor, G. L., 2003. Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton University. Princeton, NJ, 40 pp

- [16] Mellor, G. L., S. Hakkinen, T. Ezer, and R. Patchen, 2002. Conceptual Basis and Applications. In: N. Pinardi, J. Woods (Eds.), Ocean Forecasting. Springer, Berlin, 55-72.
- [17] Naimie, C. E., C. A. Blain and D. R. Lynch, 2001. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea - a model generated climatology. Continental shelf Research, 21, 667-695.
- [18] Phillips, N. A., 1957. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. Journal of Meteorology. 14: 184-185.
- [19] Simons, T. J., 1974. Verification of numerical models of Lake Ontario, Part I. Circulation in spring and early summer, J. Phys. Oceanogr., 4, pp 507-523
- [20] Teague, W. J., G. A. Jacobs, D. S. Ko, T. Y. Tang, K.-I. Chang and M.-S. Suk, 2003. Connectivity of the Taiwan, Cheju, and Korea straits. Continental Shelf Research, 23, 63-77.
- 
- 원고접수일 : 2003년 11월 18일  
원고채택일 : 2003년 12월 30일