

동중국해역에서 양자강 방류량 변화에 따른 저염분포의 수치실험

황재동* · 정희동* · 조규대** · 박성은***

*국립수산과학원 해양연구과**부경대학교 해양학과***부경대학교 해양산업개발연구소

ABSTRACT: 한반도 서남부해역은 하계 양자강의 방류에 의해 저염분 현상이 발생한다. 양자강 방류량은 해마다 일정하지 않으며, 과거 시계열자료에 의하면 최대값이 최소값보다 2배 이상이 됨을 알 수 있다. 따라서 양자강의 방류량을 달리 하여 저염분포를 수치모델로 연구하고자 하였다. 수치모델은 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하였다. POM은 연직적으로 σ -좌표계를 사용하는 3차원 순환모델이다. 모델 수행 후 연구해역내 대륙사면부에서 유속이 강하게 나타남을 알 수 있다. 또한 제주도 서쪽을 통해 북상하여 황해중앙부로 들어가는 흐름이 있으며, 대륙연안을 따라 남하하는 흐름이 있음을 알 수 있다. 양자강 방류량을 부여한 수행한 모델의 결과를 보면 양자강 방류량이 많을수록 저염분역이 제주도에 가깝게 나타남을 알 수 있다.

KEY WORDS : 동중국해, 수치모델, 저염분

포를 수치모델을 이용하여 연구하고자 하였다.

1. 서론

수치실험을 위한 대상해역은 황해, 남해 및 동중국해를 포함하는 한반도 서남부 해역이다. 황해는 한반도와 중국대륙에 둘러 싸여있는 반폐쇄적인 성질을 지닌 해역으로 평균수심은 44m, 최대수심 100m이내의 천해이며, 남해는 동중국해의 연장으로 평균수심 101m 최대수심은 대한해협에서 227m이다. 동중국해는 중국 중앙부 연안의 동쪽에 위치하고 있으며 북으로 황해와 접하고 있고 대한해협에 의해 동해와 구분되며 평균수심 349m이며 (柳, 1994; 이석, 2000; 국립수산진흥원, 2001), 최고수심은 오키나와 해분(Okinawa Trough)으로 수심 2000m 이상이고, 대만과 일본을 연결한 선을 따라 대륙사면(Continental shelf break)이 발달되어 있다 (Fig. 1).

연구해역내의 해류는 대만과 Yonaguni-jima(Ryuku Island)의 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 1,200km³정도의 담수가 유입되고 있으며, 그 중 중국대륙에 기원을 둔 양자강의 연간 방류량이 950km³정도로 전체 유입량의 79%를 차지한다. 이 외에도 70여개의 크고 작은 하천이 있는데 그 중 황하의 연간방출량은 42km³정도로 전체 유입량의 3.5%를 차지하며, 압록강(Yalu river)에서의 연간 방출량은 35km³정도로 전체 유입량의 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 방류량은 연도에 따라 다르므로 (柳, 1994; Flobal Runoff Data Center) 본 연구에서는 양자강에서 유출된 담수량의 차이에 의한 저염분 분

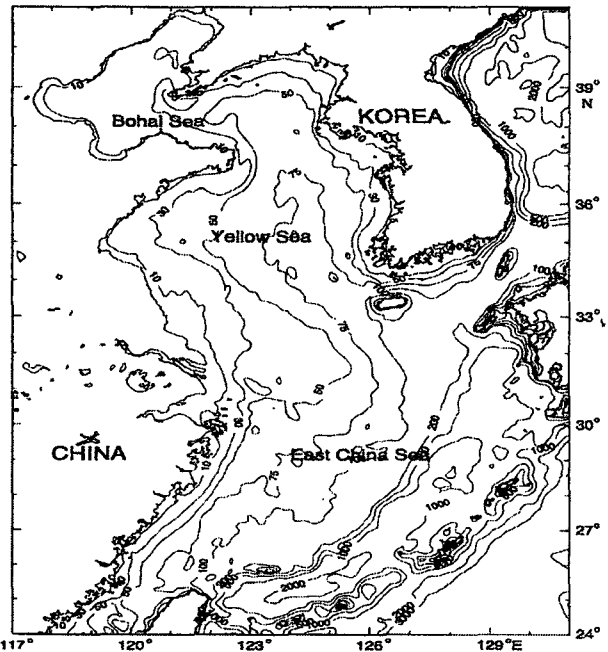


Fig. 1. Topography in the study area.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

수치모델에 필요한 수심자료는 경위도 5분간격의 수심인 DBDB5 자료 (National Geology Data Center)를 이용하여 경위도 10분간격의 자료로 다시 구성하다. DBDB5 자료가 연안 부근에서는 잘 맞지 않기 때문에 국립해양조사원에서 발간한 해도 No. S-836을 사용하여 연안부근에서 수심을 보정하였다. 양자강 방류량은 중국 大通(Datong)에서 지난 65년간 (1922-1986) 관측한 양자강의 방류량자료 (Global Runoff

Data Center)중 하계 방류량 값을 이용하였으며, 개방경계에서 해류의 수송량은 Lee and Chao (2003)에 의해 정리된 하계 값을 사용하였다 (Fig. 2).

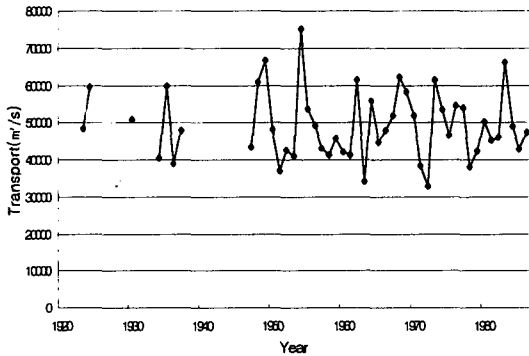


Fig. 2. Discharge variation of Yangtze river in summer seasons.

2.2 방법

본 연구해역에 3차원 해양순환모델 (Blumberg and Mellor, 1987)인 Princeton Ocean Model(POM)을 사용하여 수치실험을 하였다. POM은 수심에 대해 연직적으로 σ -좌표계를 사용하므로 해저지형의 경사가 급한 곳에서 해수유동을 재현하기에 다소 문제점을 내포하고 있는 직각좌표계의 단점을 보완하였다 (Mellor *et al.* 2002). 따라서 기본방정식들을 식(1)을 사용하여 σ -좌표계로 변환시킨다 (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 직각좌표계상에서 공간성분이며, H 는 수심, η 는 해면변위를 나타낸다. σ -좌표계로 변환시킨 후 기본방정식은 식(2), (3), (4), (5), (6), (7) 및 (8)과 같다.

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

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma=-1}^{\sigma} \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma=-1}^{\sigma} \left[\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \quad (4)$$

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

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

$$\frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \bar{p}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 t} + F_q \quad (7)$$

$$\frac{\partial \omega^2 D}{\partial t} + \frac{\partial U \omega^2 D}{\partial x} + \frac{\partial V \omega^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 D}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_\omega}{D} \frac{\partial \omega^2 D}{\partial \sigma} \right] + E_1 K \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \bar{p}}{\partial \sigma} - \frac{Dq^3}{B_1} W + F_\omega \quad (8)$$

여기서 ω 는 σ -좌표계에서의 연직유속이며 직각좌표계에서의 연직유속은 식(9)를 사용하여 변환시킨다.

$$W = \omega + U \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (9)$$

수평공간차분은 양해법(explicit)을 사용한다. 따라서 계산시간 간격은 식(10)과 같은 계산 안정조건인

Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 조건에 의해 제한된다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_t} \left| \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right|^{-1/2} \quad (10)$$

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

3. 결과 및 고찰

중국 大通(Datong)에서 관측한 양자강 방류량 자료 중 연도별 7월 양자강방류량을 Fig.2에 나타냈다. 65년간(1922-1986) 7월 평균 양자강 방류량은 49266m³/s이며, 최대방류량은 1954년에 75200 m³/s였으며, 최소방류량은 1972년에 32800m³/s였다. 최대값과 최소값의 편차폭은 42400m³/s이며, 따라서 매년 7월 양자강의 방류량이 일정하지 않다는 것을 알 수 있었다.

수치모델을 수행함에 있어 모델이 안정화 될 때까지 370일 정도는 양자강의 유출량을 산정하지 않은 상태에서 수행하였으며, 안정화된 이후 양자강 유출량을 계산하여 30일 정도 모델을 수행하였다. 모델 수행 후 유속장을 보면 대만에서 일본을 연결한 선을 따라 형성되어 있는 대륙사면에서 유속이 빠르게 나타났다. 유향은 등수심선과 거의 평행하게 나타났으며, 제주도 서쪽을 지나 황해 내부로 들어가는 흐름을 보였다. 황해 내부로 들어간 흐름은 중국보다는 한국쪽으로 접근하여 북상하며 발해만까지 유입되고 중국대륙연안과 한국연안을 따라서는 남하하는 흐름을 보이고 있다. 또한 양자강 인근해역에서 반시계 방향의 흐름이 나타났다 (Fig. 3).

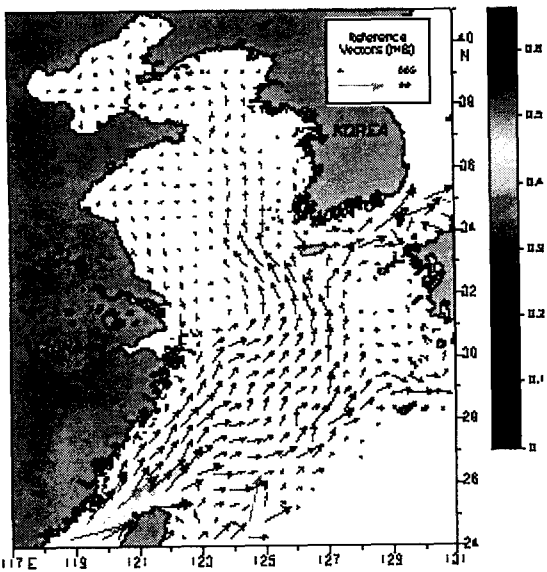


Fig. 3. Model derived depth-averaged currents after 370 Julian days.

양자강 방류량 적용에 있어 최대값, 평균값 및 최소값을 산정한 경우의 결과를 Fig. 4(a), (b), (c)에 나타내었다. 양자강 방류량이 많을수록 동중국해역에서 저염분포역은 넓게 나타났다. 또한 양자강 방류량이 최대인 경우 약 30일 뒤에 제주도 서부 인근해역까지 영향을 미치는 것으로 나타났지만 방류량이 최소인 경우에는 거의 양자강 인근해역에 머무는 것으로 나타났다. 이는 방류량이 많을수록 강물의 유속이 세기 때문이라 생각된다.

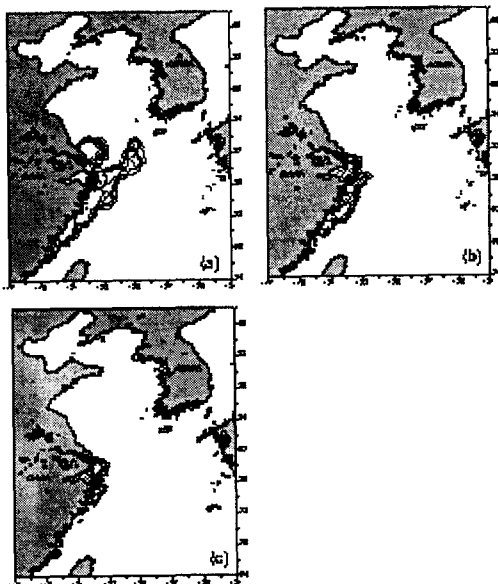


Fig. 3. Horizontal distribution of low-salinity area (a): maximum discharge, (b) mean discharge, (c) minimum discharge of Yangtze river.

4. 결론

수치모델 수행 후 결과를 보면 대륙사면에서 강한 유속이 나타났다. 또한 유향은 등수심선을 따라 거의 평행한 방향이며, 제주도 서쪽에서 황해내부로 유입되는 흐름이 보인다. 중국대륙연안에서는 남하하는 흐름이 보이며, 양자강 동쪽해역에서 반시계방향의 와류가 보인다. 유속장의 크기와 방향이 같다고 해도 양자강의 방류량 정도에 따라 동중국해에서 하계 저염분포의 분포범위는 차이를 보이고 있다.

References

국립수산진흥원, 1997. 한국근해 해양정보.
 국립수산진흥원, 1998. 한국근해 해양정보.
 국립수산진흥원, 1999. 한국근해 해양정보.
 국립수산진흥원, 2000. 한국근해 해양정보.
 국립수산진흥원, 2001. 한국근해 해양정보.
 국립수산진흥원, 2001. 한국해양편람 제4판.
 국립수산과학원, 2002. 한국근해 해양정보.
 국립수산과학원, 2003. 한국근해 해양정보.

[1] 이석, 2000. 황·동중국해에서의 조류특성과 조석의 계절 변동성 연구. 박사학위논문. 성균관대학교 토목환경공학과. pp190.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Ezer, T., H. Arango and A. F. Shchepetkin, 2002. Developments in terrain-following ocean models: intercomparison of numerical aspects, Ocean Modelling, 4, 249-267.

[5] Isobe, A., 1999. On the origin of the Tsushima warm current and its seasonality. Continental Shelf Research, 19, 117-133.

[6] 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.

[7] Mellor, G. L., 2003. Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton University. Princeton. NJ, 40 pp

[8] 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.

[9] 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.
- [10] Phillips, N. A., 1957. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *Journal of Meteorology*, 14: 184-185.
- [11] 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.