

## 개량형 POM을 이용한 수질모델의 구축에 관한 연구 A Study of Water-quality Model Building using Modified POM

조남섭<sup>1</sup>, 김연중<sup>2</sup>, 윤종성<sup>3</sup>  
Nam Seop Cho<sup>1</sup>, Yeon Joong Kim<sup>2</sup> and Jong Sung Yoon<sup>3</sup>

### 1. 서 론

진해·마산만은 해안선의 굴곡이 심하고, 수심이 얕으며, 해류의 영향이 적어 외해수와의 해수교환율이 낮은 반 폐쇄성 해역으로 영양염의 육지로 부터의 부하, 외해로부터의 유입증가, 내부생산과 저니로부터의 용출등에 의해 여러 가지 수질문제를 발생시키고 있다. 이로 인해 2000년 마산만을 특별관리해역으로 지정되어 오염총량관리제를 시행하였다. 오염총량관리제의 효율성과 폐쇄성해역에서의 수질오염기구에 대한 정량적 평가를 위해서는 유동구조의 해석을 포함한 빈산소화의 진행과정에 대한 장기적인 관측과 아울러 이를 모의하기 위한 수단의 확립이 필요할 것으로 생각 되어진다.

국립수산과학원(2004)에서 발표된 진해·마산만 빈산소수괴 발생현황의 자료를 이용하여 DO와 회귀분석을 실시한 결과, 수온성층의 형성에 강하게 의존하는 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 조홍연 등(2002)의 연구에서도 진해·마산만의 관측한 결과를 이용하여 수온관리매개변수로 DO를 선정하는 경우, 성층화 재현이 우선되어야 한다는 연구 결과를 제시하고 있다. 또한, 김연중(2008)의 연구결과에서는 해역에서의 수질 영향에 미치는 여러 가지 원인과 메카니즘을 밝히기 위하여 수질모델의 재현에 앞서 먼저 성층화 재현이 선행되어야 한다는 것을 제시 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 폐쇄성 해역에서의 유동구조의 해명과 빈산소수괴의 거동에 대한 재현

을 위해 먼저 선행되어야 할 지형성 저혈효과와 하천수 유출을 고려한 성층유동 모델을 구축하여 수온 성층구조를 재현함으로써 생태계 모델을 통한 빈산소수괴(DO<3mg/L)의 형성과정과 환경부 환경정책기본법 시행령([www.me.go.kr](http://www.me.go.kr))에서 제시한 해역수질기준을 근거로 생태계 모델 구축에 대한 정량적 평가를 실시하였다.

### 2. 유동 모델

#### 2.1 기초방정식

POM(Princeton Ocean Model)으로서, POM은 프린스턴 대학에서 해양 유동모델로서 개발한 것으로, 그 코드가 공개되어 세계적으로 검증받은 프로그램이라 할 수 있다.

국내에서도 많은 연구자들이 한국 연근해에 성공적으로 적용시킨 바 있는 POM은 하구, 연안 및 외해에 모두 적용될 수 있으며, 3차원 원시방정식을 수치화하였으므로 baroclinic for cing을 고려한 해수유동 모델링 및 수온, 염분, 오염 물질의 수송·확산 모델링에 사용될 수 있다.

$\sigma$  좌표계는 물리공간에서 비뚤어진 격자이기 때문에 좌표변환을 할 필요가 있다. 데카르트 좌표계  $(x, y, z, t)$ 에서  $\sigma$  좌표계  $(x^*, y^*, \sigma, t^*)$ 로의 변환식은 다음 식에 의하여 주어진다.

$$\begin{cases} x^* = x \\ y^* = y \\ \sigma = \frac{z-\eta}{D} \\ t^* = t \end{cases} \quad (1)$$

1 인제대학교 토목공학과 석사과정

2 인제대학교 토목공학과 석사

3 인제대학교 토목공학과 교수

여기서,  $\eta$ 는 조위,  $D$ 는 전수심( $\equiv H + \eta$ ,  $H$ 는 기준위치에서의 수심)을 나타낸다.  $\sigma$  값의 영역은 -1에서 0이고,  $z = \eta$ 에서  $\sigma = 0$ ,  $z = -H$ 에서  $\sigma = -1$ 이 된다.

본 모델에서 사용된 기본방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 속도, 수위변화, 염분과 온도장을 나타내며, 동수역학 근사와 Boussinesq 근사를 적용할 때 연속방정식, 운동방정식 및 확산방정식은 각각 다음과 같다.

■ 연속식

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

■ x방향 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(U D)}{\partial t^*} + \frac{\partial(U V D)}{\partial x^*} + \frac{\partial(U V D)}{\partial y^*} + \frac{\partial(U \omega)}{\partial\sigma} - f D V + g D \frac{\partial\eta}{\partial x^*} \\ = -\frac{g D^2}{\rho_0} \left\{ \int_{\sigma}^0 \left( \frac{\partial\rho'}{\partial x^*} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x^*} \frac{\partial\rho'}{\partial\sigma} \right) d\sigma' \right\} + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial\sigma} \right) + F_x^* \end{aligned} \quad (3)$$

■ y방향 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(V D)}{\partial t^*} + \frac{\partial(U V D)}{\partial x^*} + \frac{\partial(V V D)}{\partial y^*} + \frac{\partial(V \omega)}{\partial\sigma} + f D U + g D \frac{\partial\eta}{\partial y^*} \\ = -\frac{g D^2}{\rho_0} \left\{ \int_{\sigma}^0 \left( \frac{\partial\rho'}{\partial y^*} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y^*} \frac{\partial\rho'}{\partial\sigma} \right) d\sigma' \right\} + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial\sigma} \right) + F_y^* \end{aligned} \quad (4)$$

■  $\sigma$  방향 운동방정식

$$\rho g = -\frac{1}{D} \frac{\partial P}{\partial\sigma} \quad (5)$$

■ 수온편차의 확산방정식

$$\frac{\partial(T D)}{\partial t^*} + \frac{\partial(T U D)}{\partial x^*} + \frac{\partial(T V D)}{\partial y^*} + \frac{\partial(T \omega)}{\partial\sigma} = F_T^* + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial\sigma} \right) + \frac{\partial R}{\partial\sigma} \quad (6)$$

■ 염분편차의 확산방정식

$$\frac{\partial(S D)}{\partial t^*} + \frac{\partial(S U D)}{\partial x^*} + \frac{\partial(S V D)}{\partial y^*} + \frac{\partial(S \omega)}{\partial\sigma} = F_S^* + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial\sigma} \right) \quad (7)$$

여기서,  $U, V, \omega$ 는 각각  $x, y, \sigma$ 방향의 유속,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_0$ 는 기준밀도,  $\rho'$ 는 그 위치의 밀도와 기준밀도와의 차,  $K_M$ 은 연직 와동점성계수,  $K_H$ 는 연직 와동확산계수,  $F_x^*, F_y^*$ 는  $x, y$ 방향의 수평점성항,  $T$ 는 기준수온에서의 수온편차,  $S$ 는 기준염분에서의 염분편차,  $R$ 은 복사열,  $F_T^*, F_S^*$ 는 수온, 염분의 수평확산항을 나타낸다.

## 2.2 $\sigma$ 좌표계 유동모델의 정도 향상

### ① 수치오차의 원인

$\sigma$ 좌표계 유동모델에서 발생하는 오차의 원인은 수심의 급변화, 즉, 격자의 일그러짐이다.  $\sigma$ 좌표계 유동모델은 원래 대기의 순환 모델링과 기상예측을 위해 오랜 세월 사용되어져 왔으며(Phillips, 1957),  $\sigma$ 좌표계 유동모델에서 발생하는 오차의 원인인 지형의 급변화에 대한 수치오차도 일찍이 지적되어 왔다(Sundqvist, 1975). 지형급

변부에서의 오차발생 요인의 하나는 좌표변환시의 수평압력경사항의 근사에 의한 것이다. 수평압력경사는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{1}{\rho_a} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) = g \frac{\partial\eta}{\partial x} + \frac{g D}{\rho_a} \left\{ \int_{\sigma}^0 \left( \frac{\partial\rho'}{\partial x^*} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x^*} \frac{\partial\rho'}{\partial\sigma} \right) d\sigma' \right\} \quad (8)$$

여기서, 제 1항은 barotropic 압력항, 제 2항은 baroclinic 압력항,  $\rho_a$ 는 기준밀도,  $\rho'$ 는 기준밀도와의 편차,  $\eta$ 는 수위,  $D$ 는 수심을 나타낸다. 이 근사식을 보면 알 수 있듯이,  $\sigma$ 좌표계상의 저층부근의 격자는 실제 지형의 경사면을 따르므로, 특히 밀도차가 큰 경우에  $\sigma$ 좌표계상의 압력항 차분이 데카르트 좌표계와 비교하여 커진다. 그리고 좌표변환시에 급경사상의 격자가 hydrostatic inconsistency (Janjic, 1977 ; Haney, 1991)로 불리는 비뿔어진 상태가 되면 정도와 확산량의 산정에 큰 오차를 일으키게 된다.

확산방정식 중의 수평확산항에 대해서도 같은 모양이다. 위에서 말한 hydrostatic consistency condition에 관한 오차와 확산량이 연직방향에 큰 차이를 가지는 경우에도 수평확산항에 오차가 생기기 쉬워진다. 이와 같이, 밀도차가 큰 연안지역에 있어서 지형이 급경사인 경우 큰 수치오차를 발생시키므로 수치오차를 축소할 수 있는 어떠한 근사법이 필요하다.

### ② 오차의 보정방법

본 연구에서의 보정방법은 Sl  $\phi$ rdal(1997)에 따른 수평압력경사의 보정(Sl  $\phi$ rdal법)을 기초로 이것을 이용하여 발전시켰다. Sl  $\phi$ rdal법에 있어서 격자의 재정의와 수평압력경사의 산정방법을 통해 새로이 산정된 baroclinic 압력경사는,

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P_{bc}}{\partial x} = \frac{g}{\rho_a} \sum_{\sigma=1}^n \left[ (\bar{\sigma})_{i-1/2,\sigma} \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i-1/2,\sigma} \right] + \frac{g}{\rho_a} \left[ (z_{i-1/2,\sigma} - z) \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i-1/2,\sigma} \right] \quad (9)$$

으로 표현된다. 여기서,  $P_{bc}$ 은 baroclinic 압력으로 정의된다. 먼저 수평압력경사는 데카르트 좌표계로 변환된  $x=i$ 의 보간수심  $z=a$ 에서 아래의 식으로 정의되며,

$$\frac{\delta_a \rho}{\delta x} = \frac{\rho_{i,k(z_a)} - \bar{\rho}^z(x_{i-1}, z_a)}{x_i - x_{i-1}} \quad (10)$$

$x=i-1$ 의 보간수심  $z=b$ 에서 아래의 식으로 정의된다.

$$\frac{\delta_b \rho}{\delta x} = \frac{\bar{\rho}^z(x_i, z_b) - \rho_{i-1,k(z_b)}}{x_i - x_{i-1}} \quad (11)$$

따라서 여기서 계산된 2개의 인접한 격자의 밀도를 선형 보간하여 수평압력경사를 구한다. Sl  $\phi$ rdal법의 큰 장점은 단순히 수평압력경사를 정도 좋게 계산할 수 있다는 점뿐만 아니라 수평압

력경사를 데카르트 좌표계로 변환하여 계산함으로써  $\sigma$  좌표계 특유의 hydrostatic Consistency Condition을 만족할 필요가 없게 된다는 점이다. 또한 수평 확산경사의 산정에도 그 수법을 이용하는 것으로 새로운 정도 향상을 시험한다.

### ③ 모델의 검증

기존의 POM에 상기의 보정을 조합하여 새롭게 구축된 모델을 이용하여 연구된 결과를 한국 해안-해양공학회지(제18권 3호 pp.198~210)에 발표함으로써 모델의 적용성을 검증하였다.

## 3. 수질 모델

본 연구에서 이용되는 수질모델은 성층화를 고려한 해수유통의 결과값을 이용하였으며, 수질예측모델에서 대상으로 하는 수질지표항목은 대표적인 유기오탁지표로서 화학적 산소요구량(COD), 부영양화의 원인지표인 총질소(T-N), 총인(T-P)과 해역생물의 생식지표인 용존산소(DO)를 대상으로 모델을 수립하였다. 이들 항목은 식물플랑크톤을 주체로 하는 1차 생산을 고려하여 물질순환기구가 표현되고 있으며, 수질모델은 N, P, COD, DO의 생물-화학적 변화과정을 모델화하였다(Yamane 등,1997). 물질의 수송-확산에는 유동모델에서 얻어진 결과에서 3 유속방향 성분과 SGS 와확산계수를 이용하였다. 계산대상의 물질형태로서는 생물체유기물을 대표하는 식물플랑크톤량으로서 CHL-a, 영양염으로서 무기태질소(I-N), 무기태인(I-P), 비생물체의 유기태질소(NL-O-N), 비생물체의 유기태인(NL-O-P), 화학적산소요구량(COD), 용존산소(DO)를 설정하였다. 또한, 비생물체유기물은 Detritus태와 용존태의 유기물의 총칭이다. 각각의 7개 항목은 COD, T-N, T-P, DO로 환산된다.

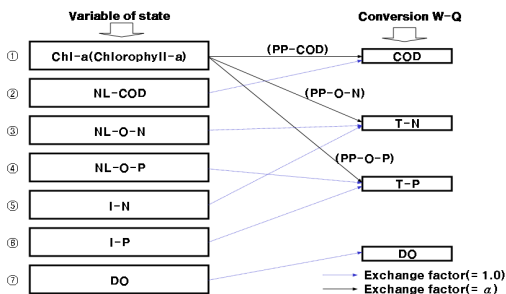


Fig. 1. The schematic diagram of Water quality model

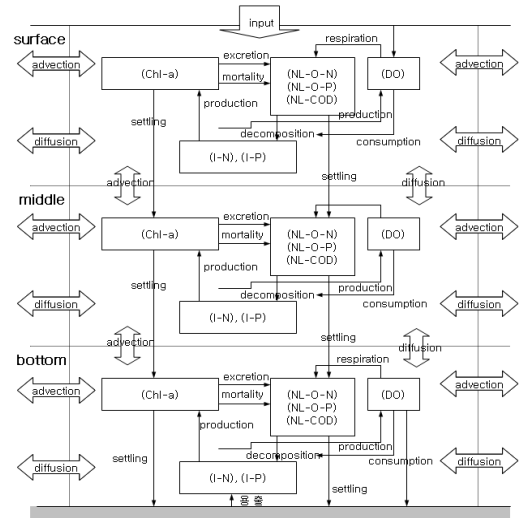


Fig. 2. The schematic diagram of Water quality model

## 4. 모델의 적용

진해·마산만을 대상으로 수온성층구조를 파악하기 위해서는 먼저 유동구조를 규명해야 한다. 따라서 본 연구에서는 우선 유동계산에서 밀도류 효과를 고려하지 않은 barotropic 유동모델로 정상상태까지 계산을 실시한 후, baroclinic 유동모델로 만내의 성층화를 충분히 재현할 수 있는 총 계산시간 30일로 유동구조계산을 실시하였다. 계산 영역내의 개경계 조건은 한국해양연구원에서 제공하는 진해·마산만에서의 주요 4분조(M2+S2+O1+K1)를 사용하여, 영역내의 좌측에 위치하는 견내량수로와 우측하단의 거제-가덕수로, 우측의 진해-가덕수로 3지점에서 개경계 조건을 부여하였으며, 연직방향으로는 15층으로 분할하였다.

대상해역 내로 유입하는 15개의 하천에 대해 수온 및 염분을 고려하였으며, 하천유량은 김종구(1994)의 하계평균유량조건을 이용하여 정상상태로 유입된다.

Table 1. Computational conditions applied to the Jinhae·Masan bay

	Condition of Computation
Horizontal	$\Delta x = \Delta y = 400m$
Vertical	$\Delta z = 15 layer$
Total number of grid	$104 \times 80 \times 15 = 124,800$
Initial Salinity	33 psu
Initial Temperature	18 °C
Time Interval	10 sec
Total Time of Computation	30 days

## 6. 결 론

본 논문에서는 수질모델의 재현에 앞서 선행되어야 할 성층화 재현을 지형성 저열효과 및 하천 유출을 고려한 성층유동모델로 전개하여 진해·마산만의 수온 성층구조의 재현을 실현한 성층유동모델을 구축하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같으며  $\sigma$  좌표계에 따른 수질모델의 연구는 계속 진행중이다.

(1) 진해·마산만의 수온 및 수질 관측 자료를 기초로 하여 회귀분석을 실시하였다. 그 결과, 진해·마산만에는  $DO = -0.6207(T_s - T_b) + 5.4671$ 의 관계가 성립하였고 이는 진해·마산만의 빈산소수괴는 수온성층의 형성에 강하게 의존하는 것으로 나타났기 때문에, 빈산소수괴의 거동을 논의하기 위해서는 수온의 성층화 재현이 중요한 것을 알 수 있었다.

(2) 진해·마산만의 수온성층유동모델의 결과, 본 모델은 유동 및 밀도구조를 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 조위·조류 비교 결과, 기존의 관측값과 계산값이 거의 일치하고 있는 것으로 나타났다. 대상해역의 대조기·소조기를 잘 재현함은 물론, 위상에 따른 창·낙조를 잘 재현한 것으로 나타났다.

(3) 수온 계산 결과, 하계 표층 25~30°C, 저층 20~24°C의 분포로 나타났으며, 저층에서는 수심이 얇은 진동만 부근을 제외하고 관측치와 잘 일치하였으며, 표층과 저층의 수온성층이 형성되어 있는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 김종구 (1994). “진해만 해역의 하계 부영양화 모델링” 부산수산대학교 환경공학과 박사학위 논문
- 김연중 (2008). “해역에서의 성층화를 고려한 수질·저질 수치모델에 관한 연구” 인제대학교 토목공학과 석사학위 논문
- 윤종성 (2006). “개량형 POM을 이용한 수역에서의 저층수의 거동에 관한 연구”, 한국해양·해양공학회 제 18권 제 3호, pp. 198-210
- Slørudal, L. H. (1997). “The pressure gradient force in sigma-co-ordinate ocean models, Int. J. Numer. Methods in Fluids, Vol. 24, pp. 982-1017
- 국립수산과학원 [www.nfrdi.re.kr](http://www.nfrdi.re.kr)
- 한국해양연구원 [www.kordi.re.kr](http://www.kordi.re.kr)

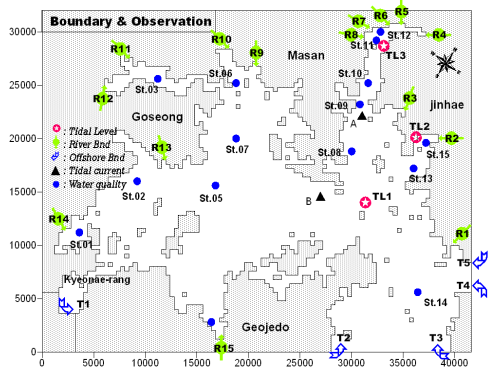


Fig. 3. Boundary conditions and observed point

## 5. 모델의 검증 및 결과

본 모델의 진해·마산만에 대한 수온 성층구조 재현과 수질 모델의 결과를 논의하기에 앞서 적용해역에서 모델의 타당성을 검증하기 위해 조위에 대한 계산치와 관측치의 비교 검증, 조류타원도의 검증을 실시한 결과 잘 일치하였으며, Fig.6에 20일 후의 표층과 저층의 수온을 나타내었다.

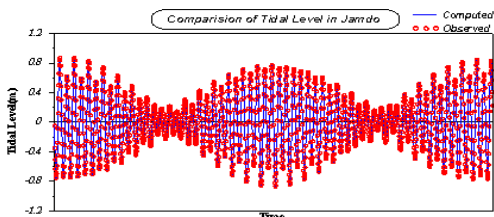


Fig. 4. Comparison between observed and calculated tidal level

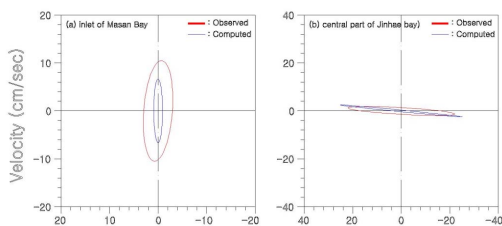


Fig. 5. Comparison between observed and calculated tidal current ellipse

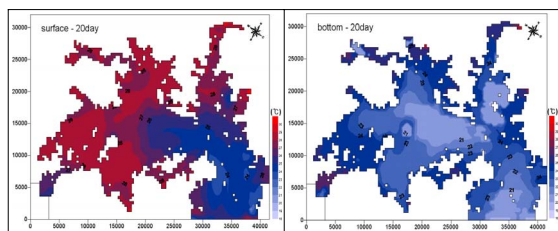


Fig. 6. Temperature of surface and bottom