

## 개량형 POM을 이용한 수역에서의 저층수의 거동에 관한 연구 A Study on the behavior of bottom water in water area by using modified POM

윤종성\* · 이동근\* · 김인철\*\*

Jong Sung Yoon\*, Dong Keun Lee\* and In Cheol Kim\*\*

**요 지 :** 본 연구에서 이용한 3차원 유동모델인 POM(Princeton Ocean Model)은 저층수의 거동예측에 유리한  $\sigma$  좌표계를 채용하고 있는 모델로서 범용성이 높고, 해양유동모델로서 개발되었지만 최근에는 연안역에서의 적용 예(박경 등, 1998)도 증가하고 있다. 기존의 POM은  $\sigma$ 좌표계 모델의 좌표변환에 기인한 수치오차에 대한 보정을 실시하지 않은 모델로서, 이러한 수치오차를 축소시키는 것은 저층부근의 유속의 정도향상에 매우 중요하지만 오차의 축소를 시도하지 않고 그대로 적용하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 Slørdal(1997)이 제안한 방법을 이용하여 오차보정을 통한 3차원 유동모델인 POM의 정도향상을 실시하였다. 구축된 모델을 이용하여 우리나라의 대표적인 기수호중 하나인 영랑호에 적용하여 저층수의 거동을 파악하고 빈산소수괴를 포함한 저층수의 거동 및 형성기구를 명확히 할 수 있는 자료로서 활용하고자 하였다. 적용결과, 기존 POM모델과 비교하여 개량형 POM모델을 이용하였을 경우 수역에서의 저층수의 거동재현에 있어서 더욱 효과가 있음을 볼 수 있었다.

**핵심용어 :** 저층수,  $\sigma$ 좌표계, Slørdal법, 기존 POM, 개량형 POM

**Abstract :** POM(Princeton Ocean Model) was utilized in this study because it took  $\sigma$ -coordinate system which could predict the behavior of bottom water. The model has been increasingly applied to costal area although it was initially developed as the ocean flow model. The original POM did not correct computational errors in transformation of  $\sigma$ -coordinate system. The trying to reduce conversional errors might improve accuracy of flow velocity in vicinities of bottom layer. Therefore, in this study it was proposed to modify the original POM by using error correction method suggested by Slørdal(1997). The modified POM was applied to Young-rang Lake, one of the typical brackish lakes in Korea. It was found that the behavior of bottom water could be well predicted. Thus, it seems that the modified POM can be used as a useful tool to clarify the mechanism of formation and behavior of bottom water including oxygen-deficient water mass.

**Keywords :** bottom water,  $\sigma$  coordinate system, Slørdal method, original POM, modified POM

### 1. 서 론

폐쇄성 강한 수역에서 빈산소수괴를 포함한 저층수는 저서생물의 생식에 악영향을 주고 수질악화를 초래하게 된다. 우리나라 남해안의 대표적인 빈폐쇄성 내만인 진해·마산만은 영양염의 축적에 의해 부영양화가 증가하여 저층에서의 빈산소수괴의 형성 및 적조의 발생에 의해 매년 수질환경문제를 야기하고 있다(국립수산진흥원, 1999). 또

한 동해안에 위치한 영랑호와 같은 기수호들은 해수교환의 차단으로 인하여 유입된 해수가 호수 하층에 존재하고 저층수가 빈산소화 되어지는 악순환이 반복되고 있는 실정으로 표층과 심층의 순환이 극히 제한되어 있으며, 심층에는 용존산소가 거의 없거나 고갈된 상태이다(安範淳, 2003). 수역에서의 수질오탁의 원인은 영양염의 육지로부터의 부하, 외해로부터의 유입증가, 내부생산과 이미 오염된 저니로부터의 용출 등이 있으며, 이러한 수질오염의 여러 가

\*인제대학교 토목공학과(Corresponding author: Jong Sung Yoon, Department of Civil Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea. civyunjs@inje.ac.kr)

\*\*동서대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Dongseo University, Busan)

지 원인과 구조를 명확하게 밝히기 위하여 수치모델에 의한 시뮬레이션이 많이 실시되어 왔다(최우정, 1993; 山根伸之, 1998; 한동진, 2005 등).

본 연구에서 이용한 POM(Princeton Ocean Model)은 Princeton 대학에서 해양 유동모델로서 개발한 것으로서, 3차원  $\sigma$ 좌표계를 이용하여 외부모드와 내부모드를 나누어 계산을 실시할 수 있는 범용 해양유동수치모델이다. 생성과 이류·확산을 포함한 유동모델을 이용한 예측계산은 저층수의 형성·발달기구를 보다 쉽게 풀기 위한 해석 기술이 될 수 있으며, 수역에서 생태계에 악영향을 주는 저층수의 거동을 파악하는 것은 저층수의 거동에 영향을 주는 인자를 분석하기 위한 자료로서 활용할 수 있기 때문이다. 데카르트 좌표계를 이용한 수치모델의 경우에는 저층이 계단형상으로 잘리어 벽면전면에 과대한 연직방향 유속을 낳게 되지만,  $\sigma$ 좌표계에서의 저층은 매끄럽게 표현되므로 이러한 오차는 없다. 이러한 점에 있어서 저층수의 거동 재현에  $\sigma$ 좌표계가 유리하지만,  $\sigma$ 좌표계는 물리공간에서 계산공간으로의 좌표변환이 필요하고 격자가 비뚤어지지 않는 데카르트 좌표계에 비해서 오차가 생기기 쉽다.

따라서, 본 연구에서는 3차원  $\sigma$ 좌표계 유동모델인 POM에 대해 Slørdal이 제안한 오차보정방법(Slørdal, L. H., 1997)을 이용하여  $\sigma$ 좌표계의 장점을 살릴 수 있는 정도향상을 실시하고자 하였으며, 특히 빈산소수괴를 포함한 저층수의 거동 재현을 최종목표로 연직방향의 유동 및 수질구조의 정도향상을 지향하였다. 본 연구에서는 개량형 POM모델을 구축하여 오차보정에 따른 정도의 차이를 검토하고, 구축된 모델을 이용하여 동해안의 대표적인 기수호중 하나인 영랑호에 적용함으로써 그 결과를 평가하고자 한다.

## 2. 좌표계 유동모델의 개요

### 2.1 지배방정식

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

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

여기서,  $\eta$ 는 조위,  $D$ 는 전수심(  $=H+\eta$ ,  $H$ 는 기준위치 수심)

$\sigma$ 값의 범위는 -1에서 0이고,  $z=\eta$ 에서  $\sigma=0$ ,  $z=-H$ 에서  $\sigma=-1$ 이 된다.

$\sigma$ 좌표계에서 POM의 지배방정식은 다음과 같다.

#### ■ 연속방정식

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

#### ■ x방향 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(DU)}{\partial t^*} + \frac{\partial(UUD)}{\partial x^*} + \frac{\partial(UVD)}{\partial y^*} + \frac{\partial(U\omega)}{\partial\sigma} - fDV + gD\frac{\partial\eta}{\partial x} \\ & = -\frac{gD^2}{\rho_0} \left\{ \int_{\sigma}^{\sigma'} \left( \frac{\partial\rho'}{\partial x^*} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D \partial\rho'}{\partial x^* \partial\sigma'} \right) d\sigma' \right\} + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_M \partial U}{D \partial\sigma} \right) + F_x^* \end{aligned} \quad (3)$$

#### ■ y방향 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(VD)}{\partial t^*} + \frac{\partial(UVD)}{\partial x^*} + \frac{\partial(VVD)}{\partial y^*} + \frac{\partial(V\omega)}{\partial\sigma} - fDU + gD\frac{\partial\eta}{\partial y} \\ & = -\frac{gD^2}{\rho_0} \left\{ \int_{\sigma}^{\sigma'} \left( \frac{\partial\rho'}{\partial y^*} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D \partial\rho'}{\partial y^* \partial\sigma'} \right) d\sigma' \right\} + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_M \partial V}{D \partial\sigma} \right) + F_y^* \end{aligned} \quad (4)$$

#### ■ $\sigma$ 방향 운동방정식

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

#### ■ 수온편차의 확산방정식

$$\frac{\partial(TD)}{\partial t^*} + \frac{\partial(TUD)}{\partial x^*} + \frac{\partial(TVD)}{\partial y^*} + \frac{\partial(T\omega)}{\partial\sigma} \quad (6)$$

$$= F_T^* + \frac{\partial}{\partial\sigma} \left( \frac{K_H \partial T}{D \partial\sigma} \right) + \frac{\partial R}{\partial\sigma}$$

#### ■ 염분편차의 확산방정식

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

여기서,

- $U, V, \omega$  :  $x, y, \sigma$  방향의 유속
- $\rho_0$  : 기준밀도
- $K_M$  : 연직 와동점성계수
- $F_x^*, F_y^*$  :  $x, y$  방향의 수평점성항
- $S$  : 기준염분에 대한 염분편차
- $F_T^*, F_S^*$  : 수온, 염분의 수평확산항
- $g$  : 중력가속도
- $\rho'$  : 場의 밀도와 기준 밀도와의 차
- $K_H$  : 연직 와동확산계수
- $T$  : 기준수온에 대한 수온편차
- $R$  : 복사열

위 식에서  $F_x^*, F_y^*, F_T^*, F_S^*$ 는 수평방향의 점성항과 확산항을 나타내고,

$$F_x^* = \frac{\partial}{\partial x} \left( H \cdot 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ H \cdot A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (8)$$

$$F_y^* = \frac{\partial}{\partial x} \left[ H \cdot A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( H \cdot 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (9)$$

$$F_\phi^* = \frac{\partial}{\partial x} \left( H \cdot A_H \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H \cdot 2A_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (10)$$

여기서,

$\phi$  : T, S  $A_M$ : 수평와동점성계수  $A_H$ : 수평와동확산계수이다. 이후의 식에서는 간단하게 나타내기 위하여  $x^*, y^*, t^*$ 를  $x, y, t$ 로 표현한다.

수평방향의 와동점성계수와 와동확산계수는 다음과 같은 Smagorinsky 형의 식을 이용한다.

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (11)$$

POM에서 연직방향의 와동점성계수와 와동확산계수는 Mellor-Yamada의 level 2.5 난류완결 모델을 적용하고 있다. 이에 대한 구체적인 내용은 문헌(Mellor and Yamada, 1982)에 자세하게 설명되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

### 2.2 수치오차의 원인

$\sigma$ 좌표계 유동모델은 원래 대기의 순환 모델링과 기상예측을 위해 오랜 세월 사용되어져 왔으며(Phillips, 1957), 중심의  $\sigma$ 좌표계로의 변환에 따른 중심의 급변화에 대한 수치오차도 조기부터 지적되어 왔다(Sundqvist, 1975).

지형급변부에서의 오차발생의 가장 중요한 요인은 좌표 변환시의 수평압력경사항의 근사에 의한 것이다. 수평압력

경사는 식(3)과 식(4)에서 좌변 마지막 항과 우변 첫 번째 항의 합으로서 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{1}{\rho_a} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) = g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD}{\rho_a} \left\{ \rho' \left( \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \right\} \quad (12)$$

여기서,

- 제1항 : barotropic 압력항
- 제2항 : baroclinic 압력항
- $\rho_a$  : 기준밀도
- $\rho'$  : 기준밀도로부터의 편차
- $\eta$  : 수위
- $D$  : 수심

위 근사식을 보면 알 수 있듯이,  $\sigma$ 좌표계상의 저층부근 격자는 실제지형의 경사면을 따르므로, 특히 밀도차가 큰 경우에  $\sigma$ 좌표계상의 수평방향 차분이 데카르트 좌표계에 비해 커진다. 또한, 좌표변환시에 급경사상의 격자가 정수역학적 불합리(hydrostatic inconsistency)(Janjic, 1977; Haney, 1991)라고 하는 왜곡된 상태가 되면 밀도와 확산량의 산정에 큰 오차를 일으키게 된다.

### 2.3 오차의 보정방법

오차를 보정하는 것은 크게 2가지 방법이 있다. Table 1은 보정법을 유형화하여 나타낸 것이다. 보정법의 하나는 일그러짐이 적은 좌표계를 채용하는 것이다. Spall과 Robinson(1990)은 계산대상이 된 물리현상에 대하여 2개의 좌표계를 조합하는 방법을 처음으로 시도하였다. 北山 등(2003)은 상층을  $\sigma$ 좌표계, 하층을 데카르트 좌표계로 하여 하상지형의 급변과 조석의 영향을 고려한 모델을 연구하였으며, Burchard와 Petersen(1997), Pietrzak 등(2002)은 연직방향의 층 두께를 적당히 변경함으로써 급경사 지형상의 격자의 비뚤어짐을 적게 하는 방법을 연구하였다.

**Table 1.** The type of error-correction method

① 좌표계의 개량	
i)	2개의 좌표계를 조합하는 방법. - Spall and Robinson(1990), 佐木(1997), 瀧岡등(2000), 北山 등(2003)
ii)	일반 연직좌표계를 채용해 격자의 일그러짐을 줄이는 방법. - Gerdes(1993), Burchard and Petersen(1997), Pietrzak et al.(2002)
② 수평압력 경사의 개량	
i)	고차항을 고려하는 방법. - 佐木(1997), 瀧岡등(2000), 北山 등(2003)
ii)	데카르트 좌표계를 이용하여 보정하는 방법. - Stelling and van Kester(1994), Slfrdal(1997), Bijvelds et al.(1998), 二瓶 등(2002)

또 하나의 방법은 수평압력경사의 계산을 개량하는 방법이다. 대표적인 예로 Stelling와 Van Kester(1994)는 수평압력경사와 수평확산경사의 보정에 착안하여 확산방정식 중의 수평방향의 확산 플럭스의 보정(SVK법)에 대한 검토를 실시했다. 이 방법은 수평확산경사의 계산시에 각 격자의 확산량을 데카르트 좌표계상에 재정의하고, 데카르트 좌표계상에서 플럭스를 산정하는 방법이다. Slørdal(1997)은 SVK법을 수평압력경사의 산정에 이용했을 경우 알고리즘상 수평압력경사가 작게 산정되는 사실을 발견하고 방법의 개량을 실시하였다. Bijvelds등(1998)은 이러한 지적을 수용하여 다른 개량 방법으로 수평압력경사의 보정에 이용하였다. 二瓶등(2002)은 흐름의 구동력 없이 안정된 밀도 성층장에서 Slørdal(1997)법의 오차저감 효과를 평가하고 보다 精度가 좋은 연직 방향의 보간방법으로서 3차원 spline 보정을 이용한 방법을 제안하고 있다.

본 연구에서는 Slørdal(1997)법에 의한 수평압력경사의 보정방법을 도입하여 POM을 개선시켰다. Slørdal법에 있어서 격자의 재정의와 수평압력경사의 산정방법의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 밀도의 정의 위치는 데카르트 좌표계상에 재정의 한 후에도 동일하다.  $\sigma$ 좌표계상 및 재정의 후의 데카르트 좌표계상의 수평방향의 격자선이  $x=i-1, i$ 에서 교차하도록 격자도 재정의된다. 층수가  $k$ 층인 경우  $i-1$ 과  $i$ 의 격자 사이의 연직방향 격자선은 최대  $2k-1$ 의 선분으로 분할된다. 그러므로 구하고자 하는 baroclinic 압력경사는 다음과 같다.

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P_{bcl}}{\partial x} = \frac{g}{\rho_{a,n=1}} \sum_{n=1}^{n-1} \left[ (\delta_x)_{i-1/2,n} \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i-1/2,n} \right] + \frac{g}{\rho_a} \left[ (z_{i-1/2,n-z}) \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i-1/2,n} \right] \quad (13)$$

여기서,

- $P_{bcl}$  : baroclinic 압력
- $N$  : 양측의 셀에 의해  $i-1/2$ 의 선을 위에서부터 차례대로 분할한 것
- $(\delta_x)_{i-1/2,n}$  :  $n$ 번째 절편의 길이

위 식의 의미는 수면에서 각 절편의 압력경사를 순차적으로 제  $n-1$ 절편까지 더하고, 제  $n$ 절편에서는 정의위치까지의 압력경사를 더한 것이 된다는 것이다. 먼저 Fig. 1의 제  $n$ 절편에서 수평압력경사는 우측  $i$ 셀의 밀도  $\rho_{i,k(z_a)}$ 의 정의위치(+지점)의 수심  $z=a$ 에서 다음 식과 같이 표현되고,

$$\frac{\delta_a \rho}{\delta x} = \frac{\rho_{i,k(z_a)} - \bar{\rho}^z(x_{i-1}, z_a)}{x_i - x_{i-1}} \quad (14)$$

좌측  $i-1$ 의 셀의 밀도  $\rho_{i-1,k(z_b)}$ 의 정의위치의 수심  $z=b$ 에서는,

$$\frac{\delta_b \rho}{\delta x} = \frac{\bar{\rho}^z(x_i, z_b) - \rho_{i-1,k(z_b)}}{x_i - x_{i-1}} \quad (15)$$

의 2개가 산출된다. 여기서,  $\bar{\rho}^z(x_i, z_b)$ 는 상하에 인접한 격자의 밀도에서 선형보간해서 산출된 값이다. SVK법에서

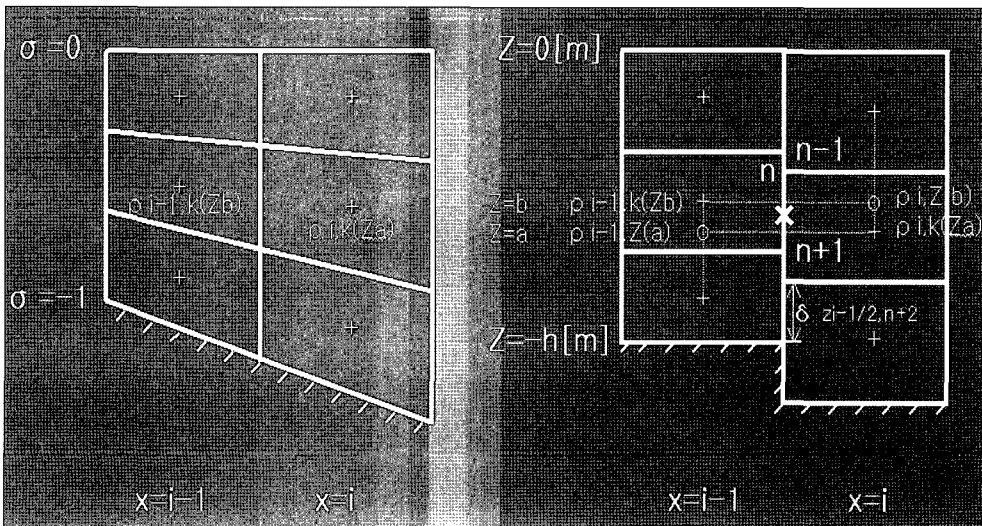


Fig. 1. Conceptual diagram of redefinition of horizontal pressure slope by Slørdal method.

는 제  $n$ 절편의 수평압력경사를 식(10)과 식(11)구해지는 경사의 부호에 의해 경우에 따라 나누어서 계산한다. SVK법에서는 수평압력경사가 작게 평가되는 문제점이 지적되고 있으므로, Slørddal법에서는 제  $n$ 절편의 수평압력경사의 정의 위치를 절편의 중점(Fig. 1의  $x$ 지점)으로 하고, 수평압력경사는  $\delta_a\rho/\delta x$  와  $\delta_b\rho/\delta x$  을 선형보간하여 구한다.

Slørddal법의 큰 이점은 단순히 수평압력경사를 精度 좋게 계산하는 점뿐만 아니라 수평압력경사를 데카르트 좌표계로 변환하여 계산함으로써  $\sigma$ 좌표계 특유의 『Hydrostatic Consistency Condition』 을 만족할 필요가 없게 된다는 점이다. 또한, Slørddal법은 위에서 서술한 SVK법에서의 수평압력경사의 과소평가를 피할 수 있다는 점뿐만 아니라, Fig. 2와 같이 계산된 값은 결과적으로 절편의 중점(Fig. 2의  $x$ 지점)의 수심에 있어서  $i-1, i$ 의 밀도의 연직방향 선형보간치의 차분과 같게 된다는 이점이 있다. 그러므로 계산 시간도 SVK법에 비해 단축되게 되며, 통상의 다른 수평압력경사의 계산법과 비교해서도 크게 길어지는 것은 아니다.

따라서 본 연구에서는 위에서 서술한 Slørddal법을 수평압력경사의 보정에 이용하여 보다 좋은 정도 향상을 꾀하고자 하였다.

### 3. 검증계산

본 연구에서는 POM에 상기의 Slørddal법에 의한 보정을 조합해서 기수역의 급경사 지형상의 저층을 따라 염수가 침입한 현상을 수평압력경사의 보정을 실시한 경우와 실시하

지 않은 경우에 대해 계산을 실시하였다.

동서 30 km, 남북 20 km, 수심 30 m, 수온 25°C, 염분 15 psu의 기수역에 동측 경계에서 수온 19°C, 염분 34psu의 염수가 단위폭당 0.5 m<sup>3</sup>/s 유입한다고 가정하였다. 격자의 크기는 1 km로 연직방향으로는 30개층으로 분할했다. 동측의 외해와의 접속부는 수심 2 m로 지형은 수평방향으로 4 km 이동하는 동안 수심이 30 m에 달한다. 서측 경계는 개경계로 하였으며, 계산시간은 48시간이다.

Fig. 4는 48시간 후의 의 동서방향 단면분포를 나타낸다. 수평압력경사를 보정한 경우(개량형 POM)는 보정을 하지 않은 경우(기존 POM)와 비교해서 고밀도의 염수(Fig. 3 ○표시)가 연직방향으로 확산되지 않고 저층으로 침입하고 있는 것을 알 수 있다.

본 검증계산에서 적용된 염수침입현상의 수리학적 조건을 밀도 Froude수(density Froude number)로 나타내면

$$F_{d0} = \frac{u_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho g h}{\rho_0}}} = 0.448 \tag{16}$$

이 된다. 이러한 조건은 須賀(1979)의 河川 感潮部에서의 혼합형태의 분류에 따르면 약혼합 또는 완혼합형태에 속한다고 할 수 있다. 따라서 Fig. 4는 염수폐기 형태로 염수가 저층으로 침입하고 있는 형태를 잘 나타내고 있으나, Fig. 3은 Fig. 4에 비해 강한 혼합형태를 나타내어 본 수리학적 계산조건을 물리적으로 타당하게 재현하지 못하는 것으로 판단된다.

이러한 계산결과와의 차이는 다음과 같이 설명이 가능하다. 수평압력경사의 오차가 큰 경우에는 결과적으로 수평방향 유속에 대해 그 오차가 영향을 미친다. 염수가 침입하는 수심 부근에서 밀도차가 크기 때문에, 특히 염수의 침입하는 속도에 큰 영향을 미친다. 사면중앙 부근의 유속의 동서성

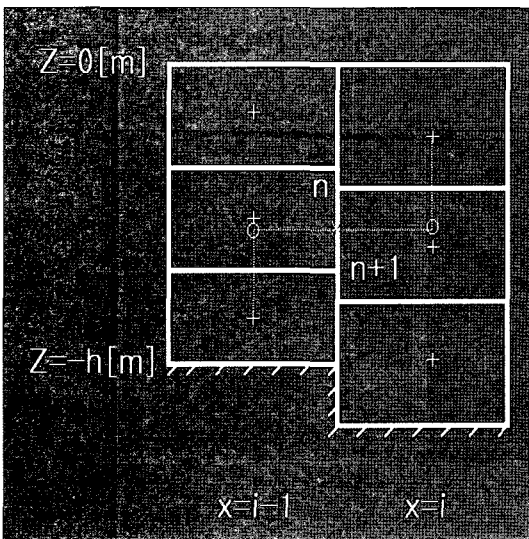


Fig. 2. Difference method of horizontal pressure slope code.

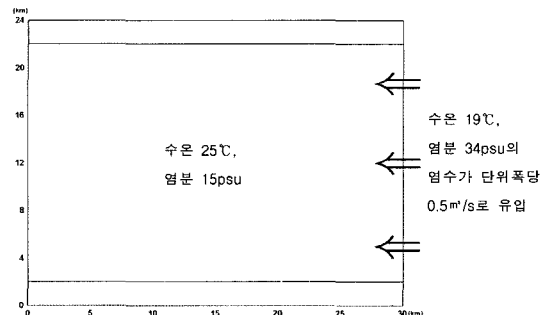
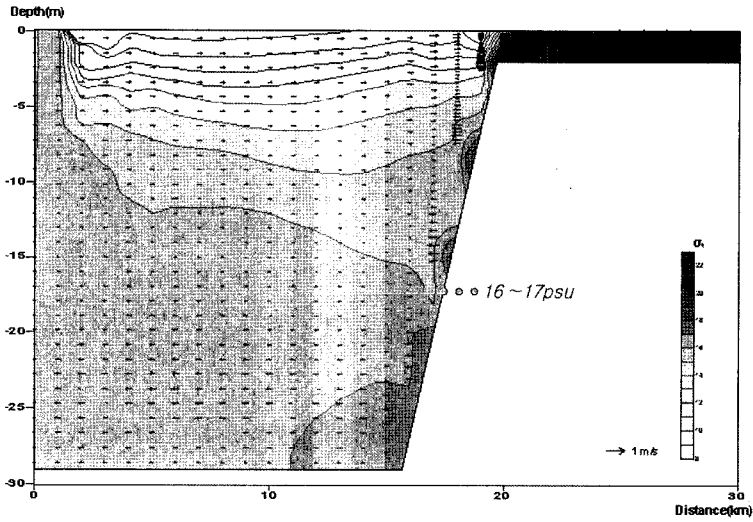
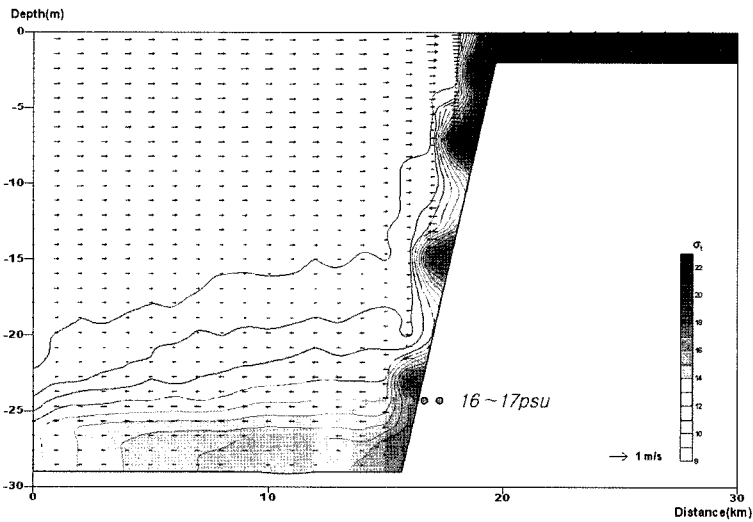


Fig. 3. Computational domain and boundary condition.



(a) original POM



(b) modified POM

Fig. 4. Computational results of saltwater intrusion (after 48hours).

분의 연직분포를 Fig. 5에 나타낸다.

저층 밀도류의 최대 유속값은 기존 POM : -64 cm/s, 개량형 POM : -42 cm/s이었다. 이 수치로부터 판단할 때 POM의 코드 자체의 정도와 불안정성을 생각하면 완벽한 평가가 가능한 것은 아니지만, 유속의 과대평가가 연직 방향 전단력을 크게 하여 확산량의 연직방향으로의 과대한 확산에 기여하는 것으로 추측이 가능하다. 이것으로 보아 수평압력경사의 보정의 효과가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 서측경계로부터 12 km지점에서  $\sigma_t$ 의 연직분포를

나타낸다.  $\sigma_t$ 가 12를 나타내는 수심은 보정을 실시한 경우가 실시하지 않은 경우에 비해 약간 깊어지는 것을 알 수 있다.

#### 4. 현장 적용을 통한 보정효과의 검토

##### 4.1 영랑호의 저층수의 형성 및 거동특성

영랑호와 같은 기수호는 담수와 해수가 공존하는 기수호로 표층에는 담수, 심층에는 해수가 존재하고 있어 수심이 얕다 하더라도 표층과 심층의 순환이 극히 제한되어 있다.

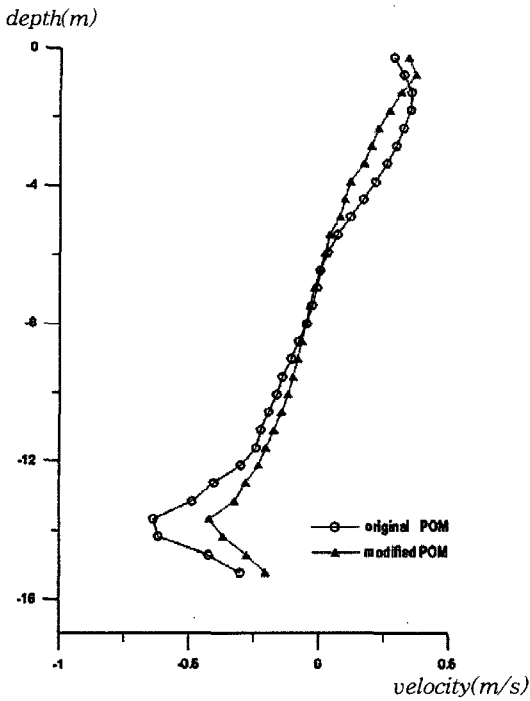


Fig. 5. Vertical distributions of horizontal velocity(center of slope).

따라서 대부분의 기수호의 경우 심층에는 용존산소가 거의 없거나 고갈된 상태이다. 그러므로 심층에서는 유기물의 분해가 매우 느릴 뿐 아니라 부산물이 생성되어 호수의 수질을 더욱 악화시킨다. 또한 바람이 많이 부는 경우는 표층수와 심층수가 뒤섞이면서 용존산소가 거의 없는 심층수가 표층으로 이동되어 악취와 함께 물고기 폐사의 원인이 되기도 한다. 이러한 악순환으로 인하여 영랑호의 수질오염은 많은 문제점을 야기시키고 있다(안범순, 2003).

Fig. 7을 보면 수온의 변화는 기온 변화와 유사하였으며, 수온의 수직적인 변화를 보면 2001년 5월에는 19°C내외로 전수심에서 유사하였고, 2001년 7월에는 표층에서 29°C, 심층에서 22°C내외로 수온약층이 형성되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 염분의 수평적인 분포는 2001년 5월의 경우 전체 층에서 8psu이었으며, 염분의 수직적인 특성을 살펴보면 2001년 5월에는 전체 층에서 균일하였으나, 2001년 7월부터는 서서히 성층이 형성되기 시작하였다. 영랑호와 같은 기수호는 염수의 유입이나 하계에 수문을 통한 태양열의 전달에 의해 성층이 형성되어(Huzzey et al., 1994), 수심이 얕음에도 불구하고 표층수와 심층수의 혼합이 극히 제한된다. 이러한 결과로 정체가 심화되는 저층수는 혐기성 상태가 유지되면서 유기물 분해가 매우 느리게 진행될 것

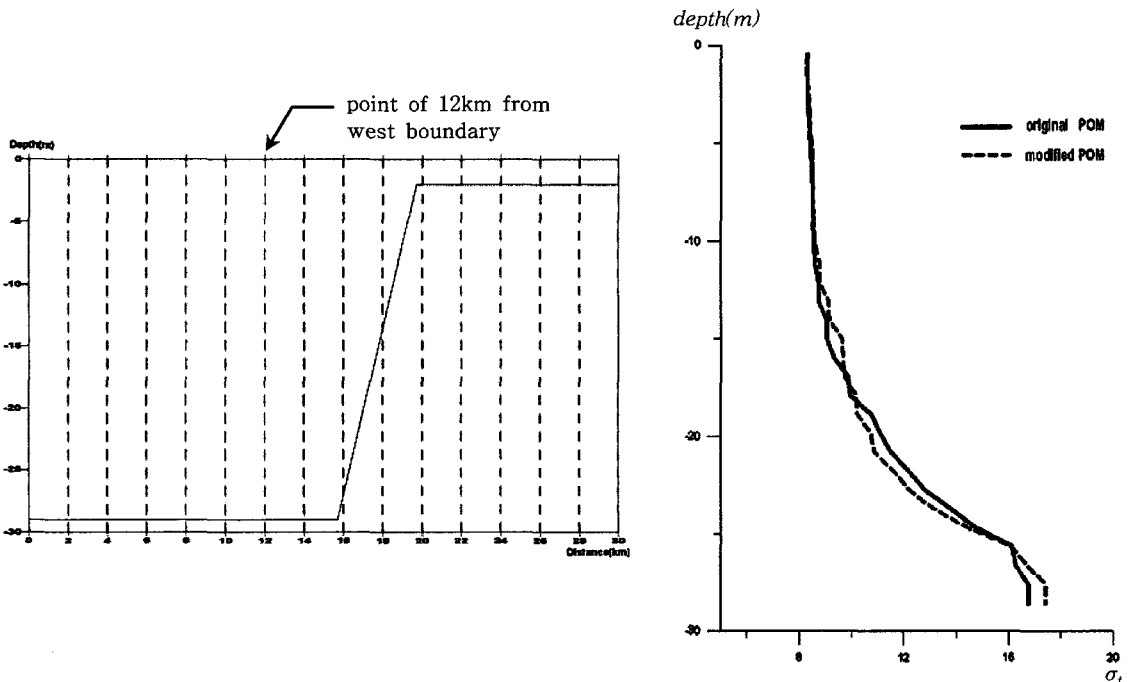


Fig. 6. Vertical distributions of (point of 12km from west boundary).

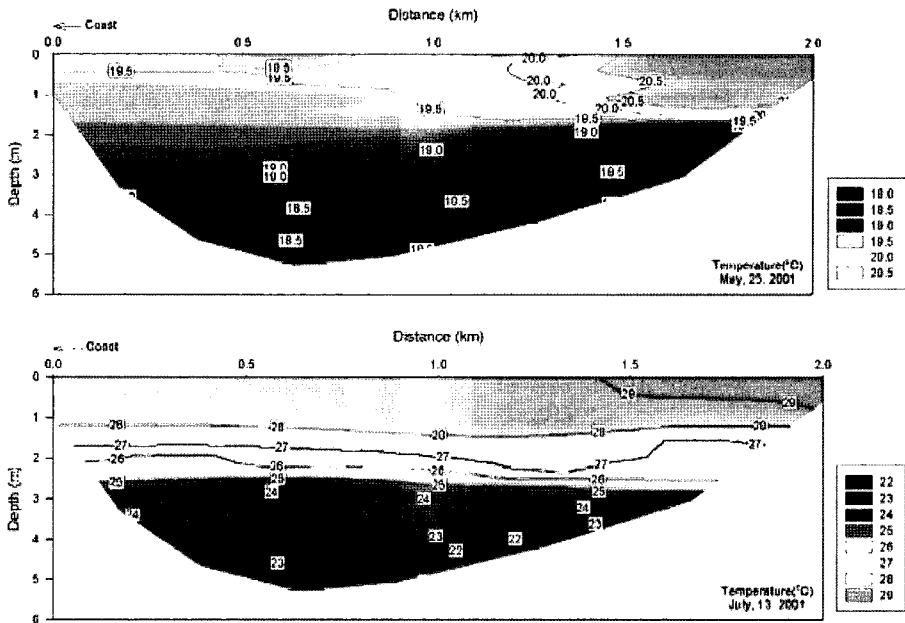


Fig. 7. Observed distributions of water temperature (from An , 2003).

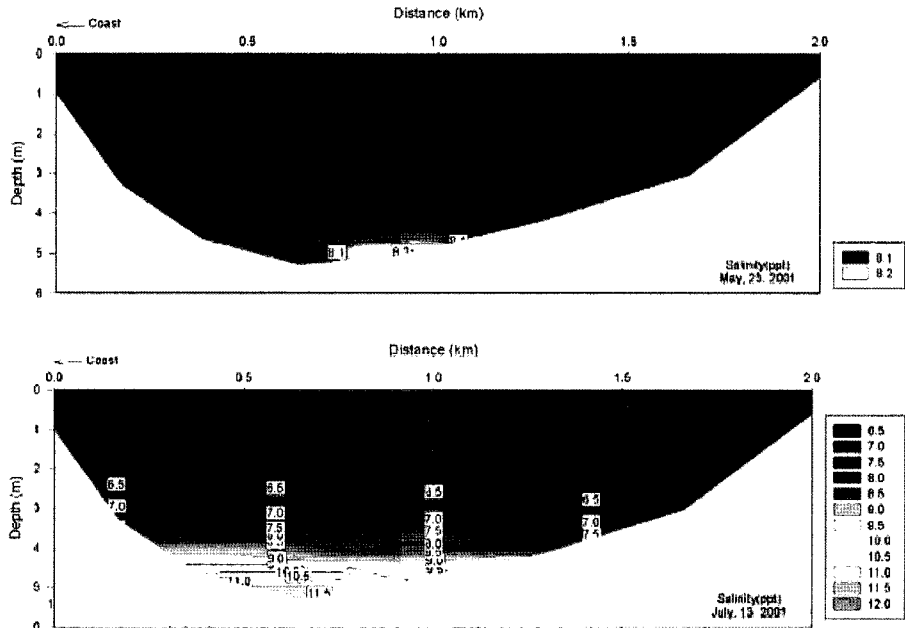


Fig. 8. Observed distributions of salinity(from An, 2003).

으로 판단된다. 본 연구에서는 2001년 5월의 영랑호 수온 및 염분자료를 기초로 실시간 기상데이터를 수면에서의 경계조건으로 입력하여 영랑호에서 발생하고 있는 7월의 성층현상을 재현하는 수치계산을 실시하고 관측결과와 비교·분석하였다.

#### 4.2 보정효과의 검토

본 장에서는 구축된 유동모델의 현지적용을 통한 적용성 및 재현성을 평가한다. 보정수법의 효과를 확실하게 하기 위해 수평압력경사의 보정을 실시한 경우와 수평압력경사의 보정을 실시하지 않은 경우의 비교를 실시한다. 영랑호와



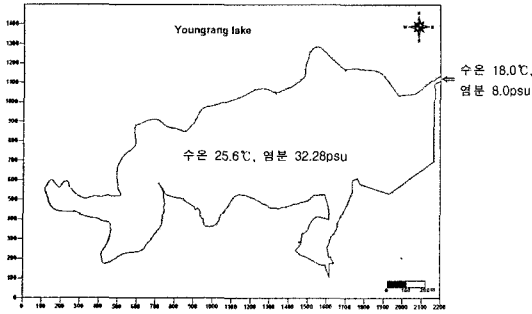


Fig. 9. Computational domain and boundary conditions.

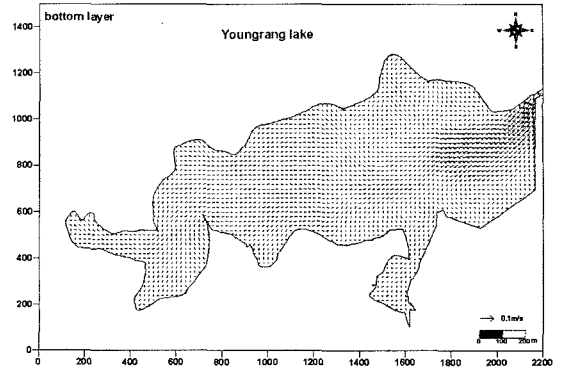


Fig. 11. Vector diagram of velocity(bottom layer).

Table 2. Computational conditions

● 계산영역	- 110 × 75 (2.2km × 1.5km)
● 격자간격	- $\Delta x = \Delta y = 20$ m
● 실험조건	
계산조건	- 영랑호 외해측의 염분 : 32.28 psu
	- 영랑호 외해측의 수온 : 25.6°C
	- 영랑호 내측의 염분 : 8.0 psu
	- 영랑호 내측의 수온 : 18.0°C
	- 기상 data : 2001년 5월~7월의 시계열 data사용 (속초 기상대)

같은 기수호에서는 해수의 교환이 이루어지지 않아 해수가 유입된 후 반영구적으로 정체되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 현상을 정도 좋게 재현하는 것으로써 본 모델의 적용성 및 재현성을 평가하고자 한다. Fig. 9에 적용영역을 나타내었으며, 계산조건은 Table 2와 같다. 수평방향의 격자는 데카르트 좌표계이고, 격자의 간격은  $\Delta x = \Delta y = 20$  m로 하였다. 연직방향으로는 10개층으로 분할했다.

Fig. 10~11은 표층 및 저층의 유속벡터도를 나타낸다. 유속은 수온, 염분의 비교에 있어서 개량형 POM모델이 본 영

역의 흐름을 타당하게 재현하고 있는가를 확인하기 위하여 나타내었다. 유속의 계산결과를 살펴보면 영랑호 입구부근에 염수가 저층으로 침입하므로 표층의 경우 유속이 약한 반면, 저층에서 강한 유속이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 표층과 저층의 유속이 보상류(compensational flow)의 흐름을 나타냄을 확인할 수 있다.

수온, 염분은 외해에서 해수의 유입량을 고려하여 수평 압력경사 보정을 실시한 경우(개량형 POM)와 보정을 실시하지 않은 경우(기존 POM)의 비교를 하였다. 수치계산 결과치를 Fig. 12~13에 나타내었고, 동측경계에서 1.3 km지점에서의 수온, 염분의 연직분포를 Fig. 14~15에 나타내었다.

수온분포에서 수평압력경사의 보정을 실시한 경우와 수평압력경사의 보정을 하지 않은 경우를 비교해보면 수평압력경사를 실시한 경우가 분포면이 더욱 매끄럽게 재현되었으며, 관측치(Fig. 7)에서 보면 7월에 표층에서 29°C, 심층에서 22°C내외로 수온약층이 형성되기 시작하였고, 관측치의 재현에 있어서 수평압력경사의 보정을 실시한 경우가 보정을 실시하지 않은 경우와 비교하여 더욱 잘 재현되었음을 알 수 있었다. 그러나 본 현장 적용계산에서는 앞의 기수호 검증계산의 경우에 비해 연직확산의 차이가 크게 나타나고 있지 않는 것을 알 수 있다. 이는 기수호의 검증계산 조건이 현장 적용계산의 경우(영랑호)에 비해 염수 유입부에서의 경사가 매우 급한 관계로 좌표변환에 따른 수평압력경사의 보정의 유무가 수질구조의 재현에 크게 영향을 미치는 사실을 반영하고 있다. 수온의 연직분포(Fig. 15)를 보면 수평압력경사를 실시한 경우 표층에서 31°C, 심층에서 21°C를 나타내었으며, 수심 2.3 m부근에서부터 수온약층이 더욱 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다.

이것으로 보아 수평압력경사의 보정을 실시한 경우가 보

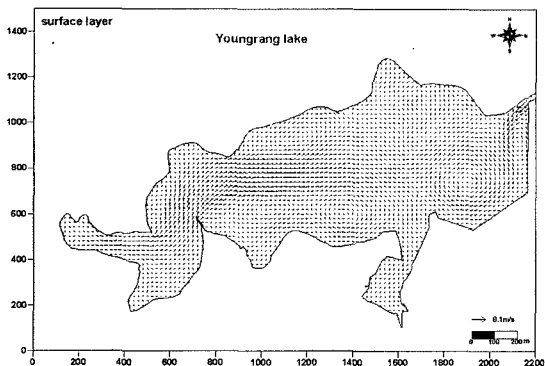


Fig. 10. Vector diagram of velocity(surface layer).

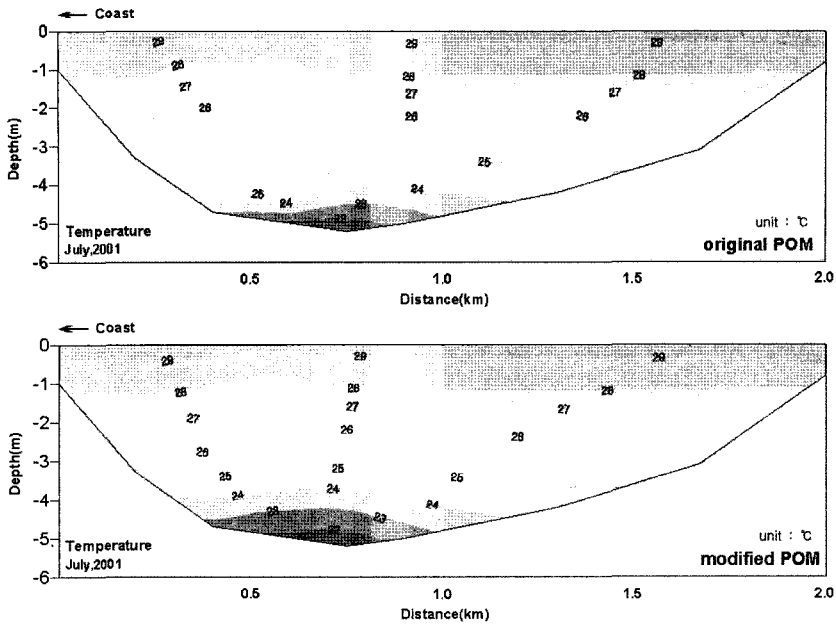


Fig. 12. Distributions of water temperature(computation).

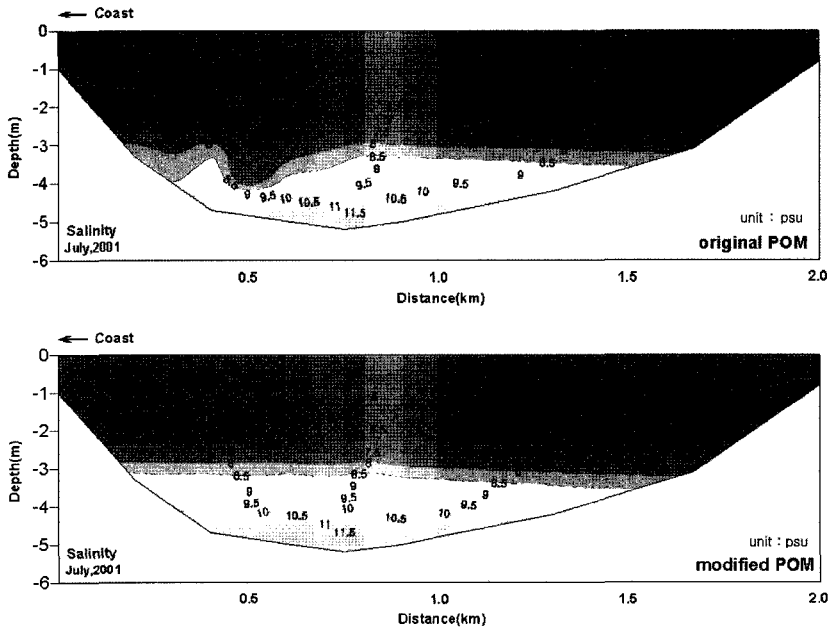


Fig. 13. Distributions of salinity(computation).

정을 하지 않은 경우 보다 얇은 곳까지 저층의 고밀도수가 침입 또는 소상하는 것을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 염분분포에 있어서도 7월의 관측치(Fig. 8)에서 보면 수심 2~3 m에서 6.0~7.0psu, 수심 4~5 m에서 9.0~11.5psu로 서

서히 성층이 형성됨을 확인할 수 있었으며, 이러한 성층현상과 등밀도면의 매끄러운 정도를 보았을 때 수평압력경사의 보정을 실시한 경우가 더욱 잘 재현되었음을 알 수 있다. 염분의 연직분포(Fig. 14)를 보면 수평압력경사의 보정

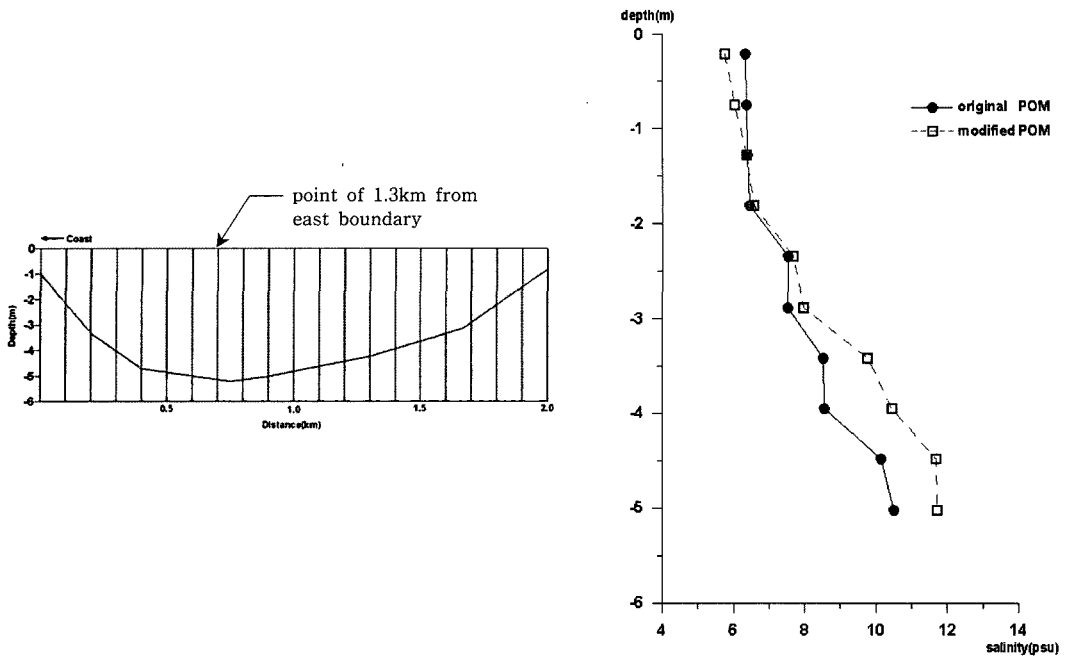


Fig. 14. Vertical distributions of salinity(point of 1.3km from east boundary).

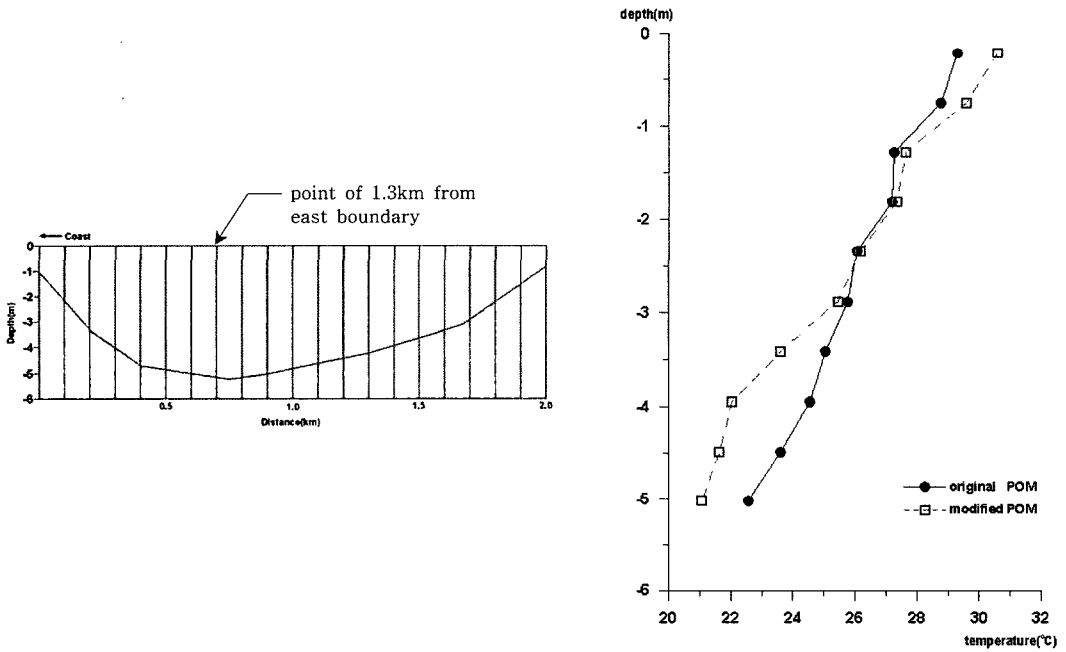


Fig. 15. Vertical distributions of temperature(point of 1.3km from east boundary).

을 실시한 경우 표층에서 6psu, 심층에서 11.7psu로 나타났으며, 수온분포와 마찬가지로 수심 2.3 m부근에서부터 성층 현상이 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이것으로 보

아 장기간의 계산시 수평압력경사의 보정을 실시할 경우 수역 전체의 유속의 과대평가와 연직방향으로의 수치계산상의 확산을 억제하는 유효한 방법이 될 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 개량형 POM모형을 구축하여 오차보정에 따른 정도의 차이를 검토하고, 구축된 모형을 이용하여 동해안의 대표적인 기수호중 하나인 영랑호에 적용함으로써 그 결과를 평가하고자 하였다.

수평압력경사를 보정한 경우는 보정을 하지 않은 경우와 비교해서 저층수가 연직방향으로 확산되지 않고 저층으로 침입하는 현상을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났으며, 이것으로 보아 수평압력경사의 오차가 큰 경우에 결과적으로 수평방향 유속에 그 오차가 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 유속의 과대평가는 연직방향 전단력을 크게 하고, 과대평가에 따른 확산량이 연직방향으로의 과대한 확산에 기여하는 것으로 추측되어진다. 따라서 Slørđal법에 따른 수평압력경사의 보정은 수역 전체 유속의 과대평가와 연직방향으로의 수치계산상의 확산을 억제하는데 유효한 방법이라고 할 수 있다.

장기 계산에 있어서 수평압력경사의 보정을 실시한 개량형 POM모형을 이용하게 되면 폐쇄성 수역에서의 빈산소 수괴를 포함한 저층수의 거동 및 형성기구를 보다 명확하게 모의함으로써, 수질오염 현상의 발생 메커니즘을 보다 정확하게 규명하여 수질오염 현상에 대한 보다 적극적인 대처방안을 수립하는데 유용한 자료가 될 것으로 판단된다. 또한 추후 본 수치모형을 수질모델과 결합하여 폐쇄성 수역에서의 빈산소수의 형성 및 거동에 대해 연구를 진행하고자 한다.

### 감사의 글

본 연구의 수행에 있어서 바쁜 일정 가운데서도 조언을 아끼지 않은 오사카대학교 入江政安 助手께 감사를 드립니다.

### 참고문헌

국립수산진흥원 (1999). 한국해양환경 조사연보.  
 박경, 오정환 (1998). 천수만과 인근연안에서 수역학모델의 보정 및 검증. 한국해양·해양공학회지, 10(3), 109-119.  
 안범순 (2003). 영랑호의 육수생태학적 연구. 석사학위논문, 삼척대학교.  
 최우정 (1993). 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션. 박사학위논문, 부산수산대학교.

한동진, 윤종성 (2005). 폐쇄성 내만에 있어서 수질·저질 상호작용 모델링. 한국해양·해양공학회지, 17(3), 129-137.  
 Bijvelds, M.D.J.P., Van Kester, J.A.Th.M. and Stelling, G.S. (1999). A comparison of two 3D shallow-water models using sigma-coordinates and z-coordinates in the vertical direction, Estuarine and Coastal Modeling. Proc. of the 6th Int. Conf., ASCE, 130-147.  
 Burchard, H. and Petersen, O. (1997). Hybridization between sigma-and z-co-ordinates for improving the internal pressure gradient calculation in marine models with steep bottom slopes. Int. J. Numer. Methods in Fluids, 25, 1003-1023.  
 Haney, R.L. (1991). On the pressure gradient force over steep topography in sigma coordinate models. J. Phys. Oceanogr., 21, 610-619.  
 Huzzey, L.M., Noble, M.A. and Ryan, G.F.M (1994). Temporal changes in stratification in Mobile Bay. Eos, 75(3), 81.  
 Janjic (1977). Pressure gradient force and advection scheme used for forecasting with steep and small scale topography. Contrib. Atmos. Phys., 50, 186-199.  
 Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Rhys., 851-875.  
 Mellor, G.L. (2004). User guide for a three-dimensional. primitive equation, numerical ocean model. <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>.  
 Mellor, G.L., Oey L.-Y. and Ezer T. (1998). Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem. J. Atmos. and Oceanic Tech., 15, 1122-1131.  
 Phillips, N.A. (1957). A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. J. Meteorol., 14, 184-185  
 Pietrzak, J., Jakobson, J.B., Burchard H., Vested, H.J. and Petersen, O (2002). A three-dimensional hydrostatic model for coastal and ocean modeling using a generalized topography following co-ordinate system. Ocean Modelling, 4, 173-205.  
 Slørđal, L.H. (1997). The pressure gradient force in sigma-coordinate ocean models. Int. J. Mumer. Methods in Fluids, 24, 982-1017.  
 Spall, M.A. and Robinson, A.R. (1990). Regional primitive equation studies of the gulf stream meander and ring formation region. J. Phys. Oceanogr., 20, 985-1016.  
 Stelling, G.S. and Van Kester, J.H.Th.M. (1994). On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep bottom slopes. Int. J. Numer. Methods of Fluids, 18, 915-935.

Sundqvist, H. (1975). On truncation errors in sigma-system models. *Atmosphere*, 13, 81-95.

北山和典·中西太·荒川英誠·中辻啓二·白波瀬卓哉·劉炳義 (2003). 3次元 塩水遡上モデルの開発と紀の川汽水域環境への評価. *水工学論文集*, 47, 1009-1014.

山根伸之 (1998). 大阪灣の流動構造と生態係を考慮した水質予測モデルに関する研究. 大阪大學學位論文.

二瓶泰雄·山崎裕介·西村司·瀧岡和夫 (2002). 浅水流場

を對象とした三次元數値モデルの近似手法に関する検討- $\sigma$ 座標系と靜水壓近似に着目して-. *海岸工学論文集*, 49, 411-415.

須賀奔三 (1979). 河川感潮部における水くさびの水理に觀する基礎的研究. *土木研究所資料*, 1537, 168-169.

---

Received May 9, 2006

Accepted September 4, 2006