

## 3-D 밀도류모델을 이용한 고온·고염수의 확산해석

김 종 인\* · 김 현 주\*\*  
(99년 3월 29일 접수)

Diffusion Analysis of the High Temperature and Salinity Water  
by the 3-D Baroclinic Flow Model

Jong-In Kim\* · Hyeon-Ju Kim\*\*

**Key Words** : Density Currents(밀도류), Diffusion Analysis(확산해석), 3-D Baroclinic Flow Model(3차원 밀도류모델), High Temperature and Salinity Water(고온·고염수), Barge-Mounted Plants(해상복합시험플랜트)

### Abstract

The diffusion characteristics of the high temperature and salinity water discharged in Chinhae Bay under BMP(Barge-Mounted Plants) desalination processes were simulated to access environmental impact. The 3-D baroclinic flow model is formulated by integrating the basic equations with respect to each control volume and by transforming them into a finite difference form using the space-staggered grid system. With a 3-D baroclinic flow model, the tide-induced and density-induced current was computed and confirmed by comparing with observed data. From the results of numerical experiment, it is expected that the maximum diffusion lengths of the high temperature and salinity which increase 0.6 °C and 0.2 ‰ after discharging are 1 km and 3.5 km, respectively. It may be expected that the discharge has an effect on surrounding area of discharge, but not an effect on whole area of Chinhae Bay.

### 1. 서 론

전세계적으로 인구가 증가하고 산업화가 가속됨에 따라 육지면적의 부족, 육상자원의 고갈 및 지구온난화 등을 포함한 지구환경문제가 인류의 생존을 위협하는 문제로 심각히 대두되고 있는 현

재의 상황에서 앞으로 우리 인류가 이 문제를 해결할 수 있는 유일한 대안의 하나가 해양의 효율적 이용 및 개발뿐임이 강조되고 있다. 이를 위해서는 해양공간을 생산, 거주 또는 여가선용의 공간으로 잘 활용할 필요가 있다. 해양공간 이용 극대화를 위한 핵심 기반기술의 개발과 경제적이

\* 정희원, 부경대학교 해양과학공동연구소

\*\* 종신회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 해양기술연구부

고 안전한 해상 대형 복합플랜트개발 및 설계기술을 확보하기 위하여 해상복합 시험플랜트(BMP: Barge-Mounted Plants)의 실험역 설치 및 가동실험이 계획되고 있다.

본 연구에서는 장래 진해만에 「해양공간이용 대형 복합플랜트」 중 해상 Barge용 담수화시설이 설치되고 가동을 개시한 후 담수화과정에서 발생하는 고온·고염수가 진해만 내로 배출되었을 경우 주변해역의 해양환경에 미치는 영향을 파악하여 저감대책을 수립하기 위한 기초적 연구이다. 이를 위해, 3차원 Baroclinic 모델을 이용하여 계산결과에서 얻어진 계산조위와 실측조위를 비교하여 모델의 타당성을 검증하여 진해만 내의 유동을 재현하였다. 이들 결과를 기초로 하여 담수화시설로부터 진해만 내로 유입되는 배출수에 의하여 야기되는 유동변화, 수온 및 염분의 확산특성을 규명하고 고찰하였다.

## 2. 3차원 밀도류모델의 구축

### 2.1 기초방정식

좌표계는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 평균해면의 한 점을 원점으로 잡고 연직방향으로 z축을 잡는다. 3차원 유동을 지배하는 기초방정식은 질량, 운동량 및 스칼라량의 보존칙을 근거로 하여 유도된다. 스칼라량의 보존칙은 수온편차 및 염분편차의 확산방정식이다. 비압축성유체에 대해 시간 평균한 후의 기초방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

#### 【연속방정식】

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

#### 【운동방정식】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \\ & = fV - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial U}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial U}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2)$$

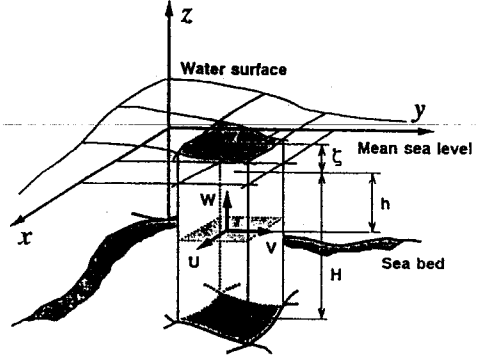


Fig. 1 Basic coordinate system

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \\ & = fU - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial V}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial V}{\partial z}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

#### 【온도편차의 확산방정식】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \Delta T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \Delta T}{\partial y}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (K_V \frac{\partial \Delta T}{\partial z}) + \frac{1}{\rho_a C_p} \frac{dq}{dz} \end{aligned} \quad (5)$$

#### 【염분편차의 확산방정식】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Delta S}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta S}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta S}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta S}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial \Delta S}{\partial y}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (K_V \frac{\partial \Delta S}{\partial z}) \end{aligned} \quad (6)$$

#### 【밀도의 상태방정식】

$$\begin{aligned} (\rho - 1) \times 10^3 = & 28.14 - 0.0735 T - 0.00469 T^2 \\ & + (0.802 - 0.002 T)(S - 35) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 각 식에 있어서 수리량에 관한 변수는 다음과 같이 정의한다.

- $U$  : x 축방향의 평균유속 ( m/sec )
- $V$  : y 축방향의 평균유속 ( m/sec )
- $W$  : z 축방향의 평균유속 ( m/sec )
- $P$  : 압력 ( ton/m<sup>2</sup> )
- $\zeta$  : 평균해수면에서 수위상승량 ( m )
- $\rho$  : 밀도 ( ton/m<sup>3</sup> )
- $\rho_a$  : 기준해수의 밀도 ( ton/m<sup>3</sup> )
- $\Delta\rho$  : 밀도편차 ( =  $\rho_a - \rho$  )
- $T$  : 온도 ( °C )
- $T_a$  : 기준해수의 온도 ( °C )
- $\Delta T$  : 수온편차 ( =  $T_a - T$  )
- $S$  : 염분(%)
- $S_a$  : 기준해수의 염분(%)
- $\Delta S$  : 염분편차 ( =  $S_a - S$  ) (%)
- $g$  : 중력가속도 ( 9.8 m/sec<sup>2</sup> )
- $f$  : Coriolis parameter
- $A_H$  : 수평방향의 와동점성계수 ( m<sup>2</sup>/sec )
- $A_V$  : 연직방향의 와동점성계수 ( m<sup>2</sup>/sec )
- $K_H$  : 수평방향의 와동확산계수 ( m<sup>2</sup>/sec )
- $K_V$  : 연직방향의 와동확산계수 ( m<sup>2</sup>/sec )
- $C_p$  : 해수의 비열 ( = 4.1898 m<sup>2</sup>/sec )  
( 4.18×10<sup>-6</sup> J/ton/ °C )
- $q$  : 해면출입 단파 복사량의 열원함수 ( W/m<sup>2</sup> )

임의수심에서의 압력은 식(4)으로 부터 다음과 같이 유도된다. 여기서 기준면으로부터 수면까지의 높이(기준수면으로부터의 수위)를  $\zeta$ 라하고, 또한  $\rho = \rho_a - \Delta\rho$ 라 두면,  $z = -h$ 에서의 압력은 다음 식으로부터 구해진다.

$$P_{z=-h} = \int_{-h}^{\zeta} \rho g dz = \int_{-h}^{\zeta} \rho_a g dz - \int_{-h}^{\zeta} \Delta\rho g dz \quad (8)$$

$$= \int_{-h}^0 \rho_a g dz + \rho_a g \zeta - \int_{-h}^{\zeta} \Delta\rho g dz$$

우변의 제1항은, 정지상태( $\zeta=0$ )일 때의 기준밀도

$\rho_a$ 에 의한 정수압이고, 동일한 수심에 대해서는 x 및 y에 관계없는 일정한 값을 갖는다. 식(2)와 식(3)중의  $\partial P / \partial x$  및  $\partial P / \partial y$ 에는 아무런 영향도 주지 않는다. 따라서, 압력P는,

$$P_{z=-h} = \rho_a g (h + \zeta) - \int_{-h}^{\zeta} \Delta\rho g dz \quad (9)$$

로 정의된다. 여기서, 우변의 제1항은 수위가 정지상태( $\zeta=0$ )에서 이동할 때의 기준밀도에 의한 압력이고, 임의수심에서 일정한 값을 갖는다. 우변의 제2항은 밀도편차에 의한 압력, 즉 부력효과에 의한 압력의 감소분을 나타낸다. 전자가 Barotropic(順壓)흐름, 후자가 Baroclinic(傾壓)흐름을 일으킨다.

## 2.2 해수표면에서의 열수지산정

기상자료를 사용한 열수지산정식은 호수나 해양을 대상으로한 수많은 식이 제시되고 있다. 본 연구에서는 일본의 세토내해에서 수치실험을 통해 계산된 수온과 염분분포가 실험결과와 일치하는 것으로 평가되었던 村上 등<sup>5)</sup> (1987)의 산정식을 채용하였다.

해수면에서의 열교환과정은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이, 태양으로부터의 단파복사, 대기로부터 해수면으로의 복사, 해수면으로부터 대기로의 복사, 수온과 기온차에 의한 열교환(현열수송), 증발(현열수송)이 있다. 이들과 해수면에서의 전달 열수송량은 해수면에서 평형상태에 달하고 있기 때문에, 해수면에서의 전달수송량  $Q_{flux}$ 는 식(10)으로 표시된다. 단, 열량수지는 대기로부터 해수면으로 입

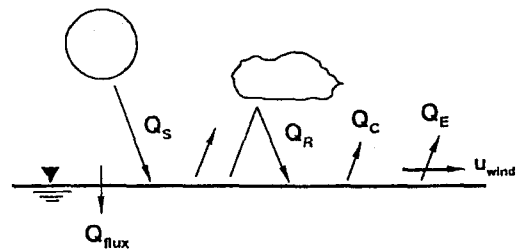


Fig. 2 The system of heat exchange on sea surface

사(가열작용)하는 것을 (+)로 취급한다.

$$Q_{flux} = Q_s + Q_R + Q_E + Q_C \quad (10)$$

여기서,  $Q_{flux}$ 는 해수면에 유입하는 전 열수송량

( $W / m^2$ )이며,

$Q_s$ 는 유효일사량 ( $W / m^2$ )

$Q_R$ 는 장파반사에 의한 유효복사열량 ( $W / m^2$ )

$Q_E$ 는 증발에 의한 현열수송 ( $W / m^2$ )

$Q_C$ 는 현열수송량 ( $W / m^2$ )이다.

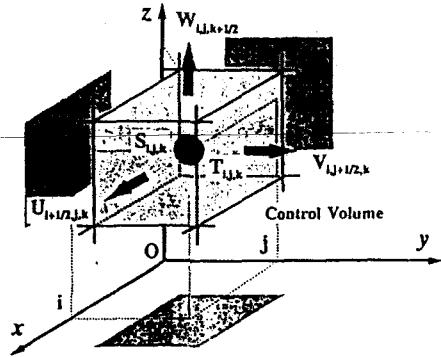


Fig. 3 Staggered finite difference grid system

### 2.3 차분화와 수치해석법

#### 2.3.1 차분화에 의한 기초식의 이산화

차분격자망에는 Fig. 3에 나타내는 staggered grid를 사용한다. 이 격자망을 사용하면 각 변수의 정의 위치 및 대상으로 하는 control-volume이 각각 달라진다. 따라서 각 변수의 정의는 다음과 같이 정한다. 이 결과  $\zeta$ ,  $P$ ,  $\rho$ ,  $T$ ,  $S$ 의 정의 위치는 동일직선상에, 또한  $U$ ,  $V$ 는 동일평면에 정의하고,  $x$ ,  $y$ 방향으로 각각 반격자씩 비껴서 정의한다.

수위변동량 ( $\zeta$ ) :  $x + \Delta x, y + \Delta y$

$x$ 방향성분 유속( $U$ ):  $x, y + \Delta y, z + \Delta z$

$y$ 방향성분 유속( $V$ ):  $x + \Delta x, y, z + \Delta z$

$z$ 방향성분 유속( $W$ ):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z$

압력( $P$ ):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

수온( $T$ ):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

염분( $S$ ):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

밀도( $\rho$ ):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

수평와동점성계수(AH):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

연직와동점성계수(AV):  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

차분방정식의 유도는 Suginothara et al.<sup>4)</sup>(1987), Iwasa<sup>3)</sup>(1983)에 의해 채용된 control-volume법을 사용한다. 즉 운동방정식에 있어서, 시간에 관해서는 원칙적으로 중앙차분(leap frog method)을 쓰고, 이류항에 대해서는 전진차분법으로, 확산항에 대해서는 이류항 및 Coriolis항의 시간step 보다 1 step 늦은 값(즉  $2\Delta t$ 의 시간간격의 전진차분을

취한 값)을 택한다. 이것은 중앙차분에서는 확산항을 다른 항과 같은 시간step의 값을 써서 계산하면 항상 불안정하기 때문이다(Suginothara · Onishi, 1978)<sup>4)</sup>. 수온 및 염분의 확산방정식에 대해서도 운동방정식과 같은 가정하에 차분화한다.

#### 2.3.2 자유수면의 취급과 음적해법의 알고리즘

##### (1) 자유수면의 표현

본 연구에서 대상으로 하고 있는 연안해역의 흐름은 조석, 열유입, 하천수의 유입, 바람 등의 외력과 해수면 경사에 의한 동수경사력, 부력이 직접 작용하여, 조류, 밀도류, 취송류 등과 같은 특이한 유동체계를 형성하고 있다. 따라서 수표면을 여하히 엄밀하게 표현할 수 있는가가 유동의 재현성을 향상시키기 위한 관건이 된다.

일반적으로 수표면을 표현하는 방법으로는 자유수면모델과 rigid lid모델의 2종류가 있다. 그 중 자유수면모델은 계산격자를 신속성있게 함으로써 수면형을 직접 표현하는 방법으로서 그 기초가 되는 것은 수표면의 운동학적조건이다. 이로부터 중력파에 의한 파동의 전달을 표현할 수 있게 되므로, 조류나 밀도류가 존재하는 연안해역에서 볼 수 있는 물리과정을 대상으로한 수치적 연구에서 자주 활용되고 있다. 본 연구에서는 조석변동에 의한 자유수표면을 정확히 산정할 필요가 있으므로 자유수면 모델을 채용한다.

밀도류 수치모델에서 중요한 파라메타인 수위상

승량을 음해법으로 푸는 알고리즘에 대해서 서술한다. 시간 축에 대해서,  $t = n\Delta t$ 와  $t = (n + 1)\Delta t$ 에서의 수리량을 기지의 값으로 한 경우에  $t = (n + 2)\Delta t$ 에 있어서 수리량을 구하는 경우를 생각한다. 압력 중 중력성분을 제외한 수위변동량  $\zeta$ 와  $U, V$ 에 대해서 가중평균파라메타  $\theta$ 를 정의해서 다음 식과 같이 평가한다.

$$\zeta^{n+1} = (1 - \theta)\zeta^n + \theta\zeta^{n+2} \quad (11)$$

$$U^{n+1} = (1 - \theta)U^n + \theta U^{n+2} \quad (12)$$

$$V^{n+1} = (1 - \theta)V^n + \theta V^{n+2} \quad (13)$$

여기서,  $\zeta^{n+2}$ 는 미지량이므로  $\theta \neq 0$  일 때에는 차분식은 음해법이 된다.

식(1)의 연속식을 수표면 및 해저면에 있어서의 경계조건식을 고려해서 해저면으로부터 해수면까지 적분하고, 시간축에 대해서만 중앙차분을 써서 차분화하면 다음 식이 얻어진다. 이때, 유속에 대해서는 식(12)와 식(13)의 가중평균 파라메타로서 정의한 변수를 사용한다.

$$\frac{\zeta^{n+2} + \zeta^n}{2\Delta t} = - \int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial \{ (1 - \theta)U^n + \theta U^{n+2} \}}{\partial x} dz - \int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial \{ (1 - \theta)V^n + \theta V^{n+2} \}}{\partial y} dz \quad (14)$$

또, 식(11)로서 정의한 수위상승량을 써서 식(2) 및 (3)의 운동방정식을 차분화하고, 각각  $U^{n+2}, V^{n+2}$ 에 대해서 정리하면, 식(15) 및 식(16)으로서 나타낸 바와 같이  $\zeta^{n+2}$ 를 종속변수로 하는 형태로 나타낼 수가 있다.

$$U^{n+2} = U^n + \frac{2}{\Delta t} \text{func} \{ \zeta^{n+2}, \zeta^n, U^{n+1}, V^{n+1}, U^n, V^n \} \quad (15)$$

$$V^{n+2} = V^n + \frac{2}{\Delta t} \text{func} \{ \zeta^{n+2}, \zeta^n, U^{n+1}, V^{n+1}, U^n, V^n \} \quad (16)$$

운동방정식으로부터 얻어진 식(15)와 식(16)을 연

속방정식으로부터 얻어진 식(14)에 대입함과 동시에 공간에 대해서도 차분화하면, 식(17)과 같이  $\zeta^{n+2}$ 에 관한 연립 1차방정식이 유도된다.

$$\zeta_{i,j}^{n+2} = A_0 + A_1 \zeta_{i+1,j}^{n+2} + A_2 \zeta_{i-1,j}^{n+2} + A_3 \zeta_{i,j+1}^{n+2} + A_4 \zeta_{i,j-1}^{n+2} \quad (17)$$

단, 공간축에 대해서  $x = i\Delta x, y = j\Delta y$ 라 하고,  $A_0 \sim A_4$ 는  $n$  및  $n+1$ 의 step에서 나타나는 기지량이다.

### 2.3.3 계산의 흐름

흐름장의 계산에는 가중평균파라메타를 사용한 음해법에, 또 수온 및 염분의 산정에는 완전양해법에 의거하여 계산한다. 가중평균파라메타는 흐름의 안정성을 고려해서 0.75로 한다. 또, 시간의 차분화에 중앙차분을 사용하므로 생기는 계산결과의 오차를 소거하기 위하여 30 steps에 1번 Matsuno 방법에 의해 시간의 차분화에 전진차분을 도입한다. 계산의 1 step은 다음 순서에 의해 행한다.

- ① 식(17)에서 얻은  $\zeta^{n+2}$ 에 관한 연립1차방정식을 SOR법에 의해 푼다.
- ②  $\zeta^{n+2}$ 를 가지고 식(8)을 써서 압력  $P^{n+2}$ 를 구한다.
- ③  $P^{n+2}$ 를 가지고 식(2)로서  $U^{n+2}$ , 식(3)으로서  $V^{n+2}$ 를 구한다.
- ④  $U^{n+2}$  과  $V^{n+2}$ 를 가지고 식(1)로써  $W^{n+2}$ 를 구한다. 이 때 계산은 해저면으로부터 해수면방향으로 순차적으로 계산한다.
- ⑤  $U^{n+2}, V^{n+2}$  및  $W^{n+2}$ 를 가지고, 식(5)를 써서  $T^{n+2}$ , 식 (6)을 써서  $S^{n+2}$ 를 구한다.
- ⑥  $T^{n+2}$ 와  $S^{n+2}$ 를 가지고 식(7)을 써서  $\rho^{n+2}$ 를 구한다.

### 2.4. 수치실험의 계산대상영역 및 입력 조건

BMP에 설치될 담수화 플랜트 가동에 따라 배출되는 고염·고염수의 확산범위를 예측하기 위하여 기초자료가 되는 조위의 비교점 및 수심도는 Fig. 4에 나타난 바와 같으며, 유동계산시에 사용한 제 입력조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Conditions for numerical simulation

Item	Simulation condition
Time interval	30 sec
Horizontal mesh interval	500 m
Vertical direction resolution(7 levels)	3 m, 3 m, 3 m, 3 m, 3 m, 3 m, 10 m
Summer atmospheric condition(7, 8)	· Air Temp.: 26.23 °C · Vapor pressure : 26.2 hPa · Cloud: 6.7
Sea boundary condition(7,8 mean) -Soemal, Keoje	· Seawater Temp. : 22.60 °C · Salinity : 29.625 ‰
Discharge boundary condition	· Temperature: 35.1 °C · Salinity: 59.25 ‰ · Quantity: 50 m <sup>3</sup> /day
Tide	M2
Drag coefficient	· Sea floor: $2.6 \times 10^{-3}$ · Wall: $1.0 \times 10^{-3}$
Horizontal eddy coefficient	SGS Model: 50 ~ 0.1 m <sup>2</sup> /sec
Vertical eddy coefficient	Neutral cond. 0.005 m <sup>2</sup> /sec
Coriolis parameter	$4.1711 \times 10^{-9}$ / sec(N35°)
Total computing time	60 tides

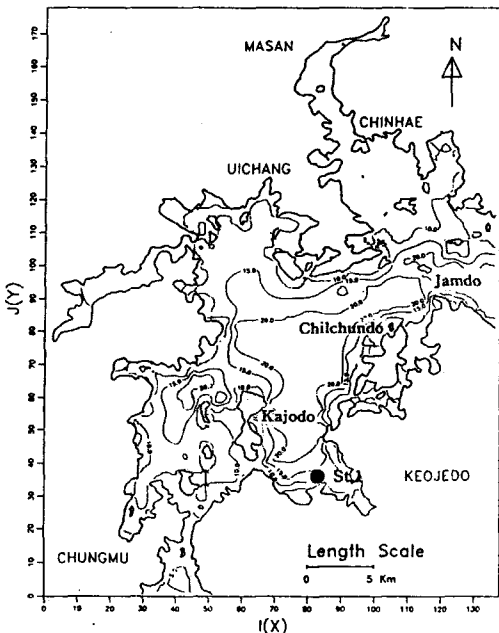


Fig. 4 Location map of the objective area and bathymetry

### 3. 3차원 밀도류 수치모델에 의한 해수 유동

전술한 수치모델<sup>1)</sup>에 의한 해수유동의 재현성을 확인하기 위하여 1997년 2월 24일 진해만 내의 본 사업예정지 전방해역의 Station 1(Fig. 4)에서 실측한 조위자료와 계산치를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 진해만에서의 조석은 M2조가 우세하며, M2 분조의 주기는 12시간 25분씩으로 약 25분씩 차이가 발생하므로 본 수치실험에서는 계산상의 편의를 위하여 M2 분조의 주기를 12시간으로 설정하였기 때문에 그림에서 알 수 있는 바와 같이 고조 및 저조가 나타나는 조시는 약간의 차이를 나타내고 있지만, 본 수치계산에서 사용한 수치모델은 진해만 내의 해수유동을 양호하게 재현하고 있음을 확인할 수 있었다. 여기서, 수온 및 염분을 7, 8월의 평균치를 사용한 것은 하계에 태양에 의한 가열로 인하여 기온 및 수온이 비교적 높고, 온배수에 의한 수온상승이 주변해양환경에 미치는 영향이 최대일 것으로 추정되기 때문이다.

Fig. 6은 진해만 내의 수심 1.5m(제 1층), 4.5m(제 2층), 7.5m(제 3층)에서의 조석잔차류의 유속벡터를 나타낸 것으로, 잠도 부근해역에서는 잠도를 중심으로 제1층, 제2층, 제3층 모두 북측 및 남측해역에 시계방향으로 회전하고 대칭인 환류가 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 진해만 내의 해수는 잠도를 중심으로 북측해역을 통하여 유입되고, 남측해역을 통하여 유출되는 해수교환 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 가조도 동쪽해역에는 시계방향으로 회전하는 환류가

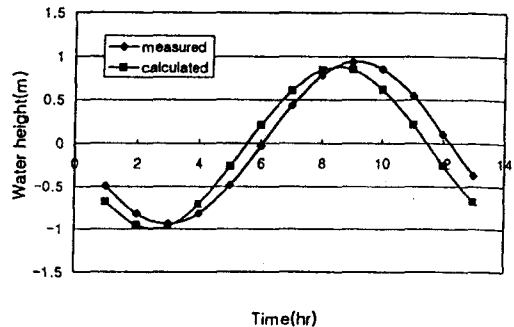


Fig. 5 Computed and observed tidal level

3-D 밀도류모델을 이용한 고온·고염수의 확산해석

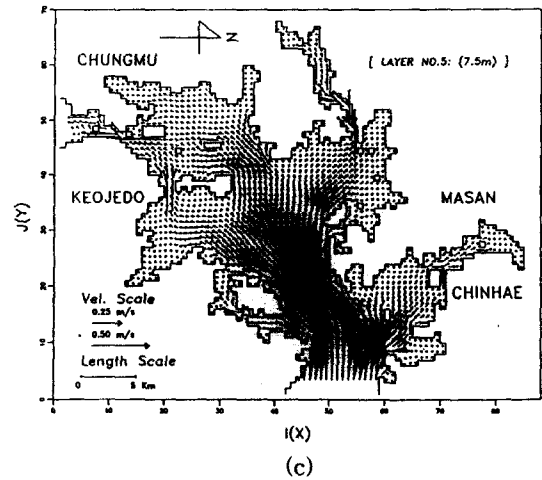
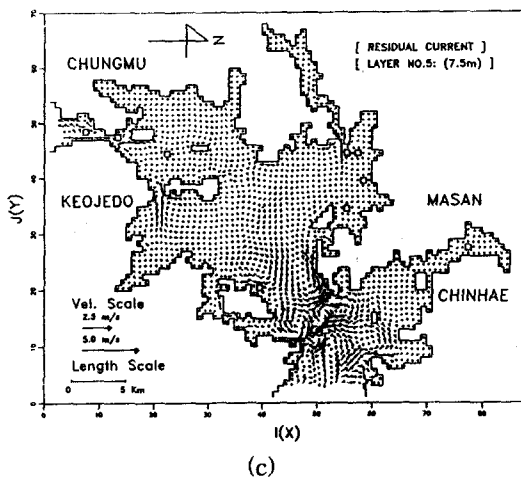
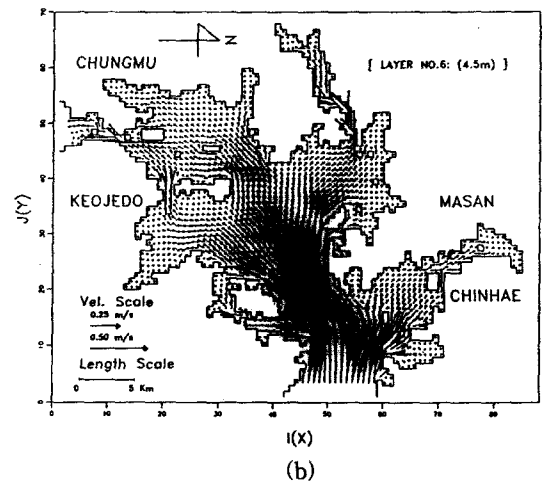
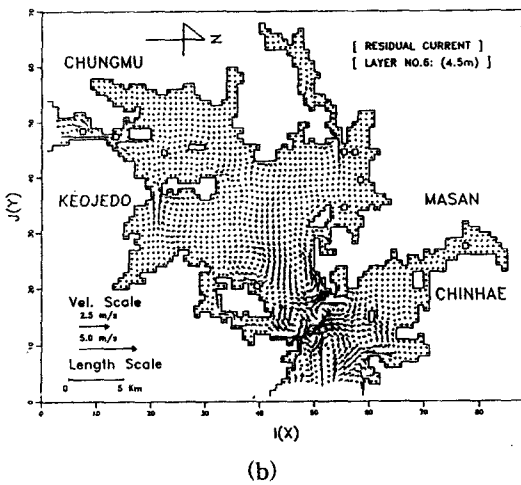
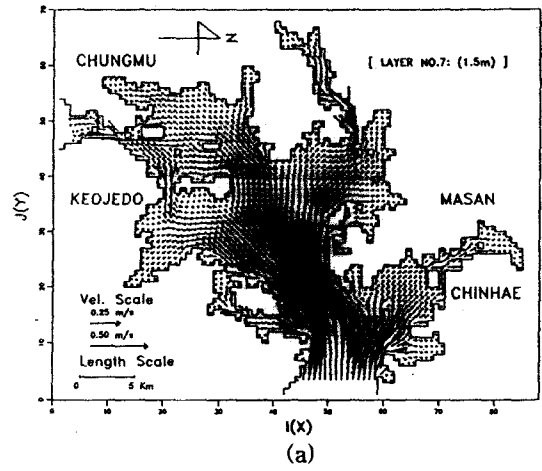
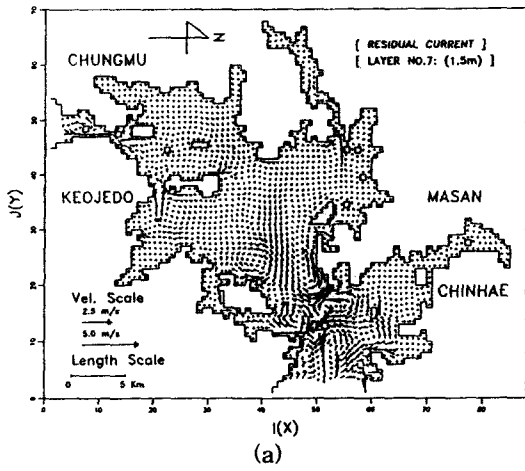


Fig. 6 Computed tidal residual currents (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths under the spring tides

Fig. 7 Computed tidal currents vector diagrams at the (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths on the flood flow under the spring tide

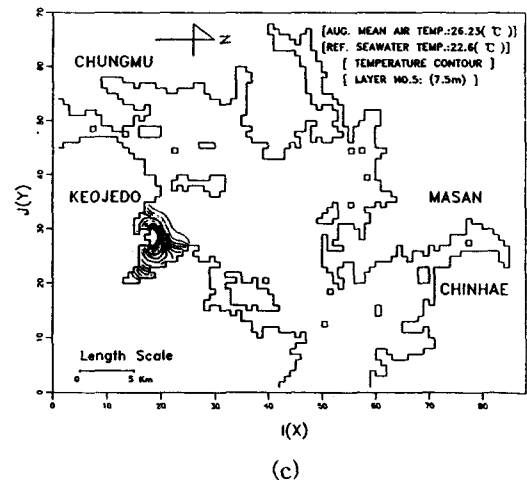
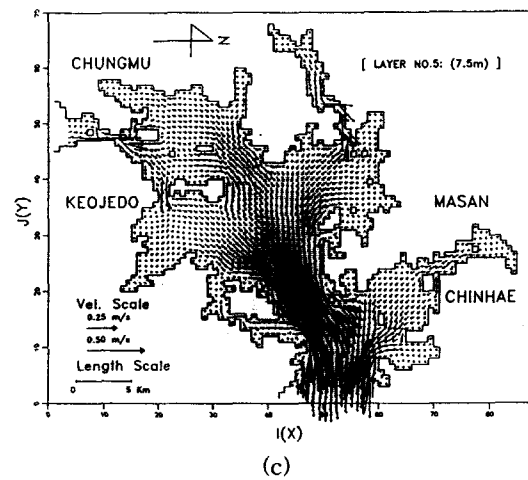
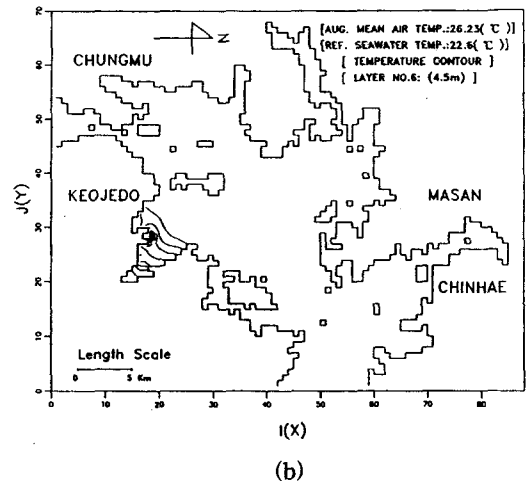
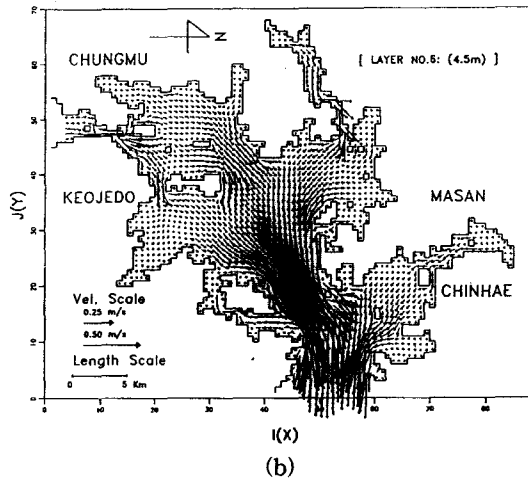
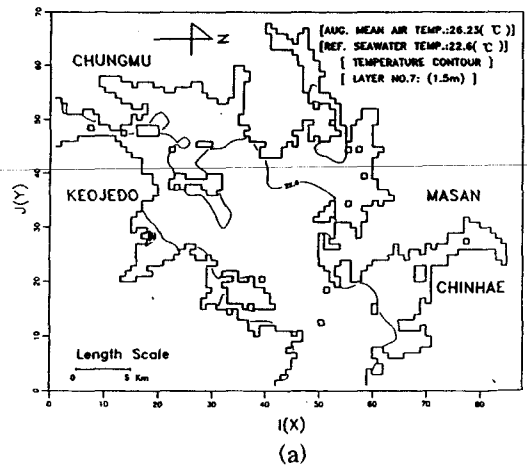
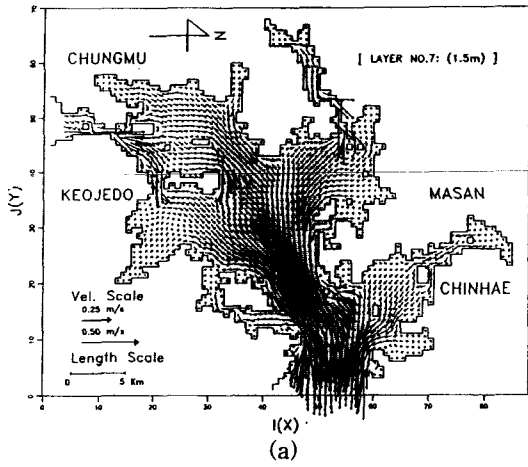
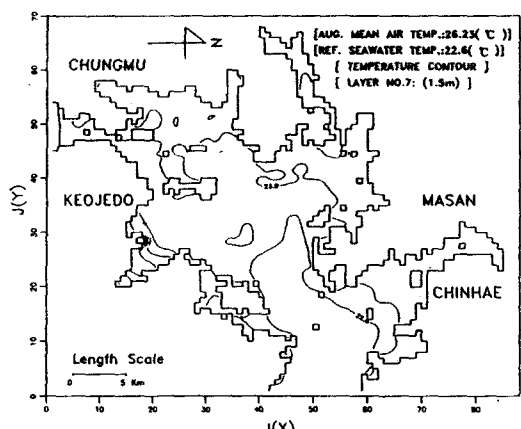


Fig. 8 Computed tidal currents vector diagrams at the (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths on the ebb flow under the spring tide

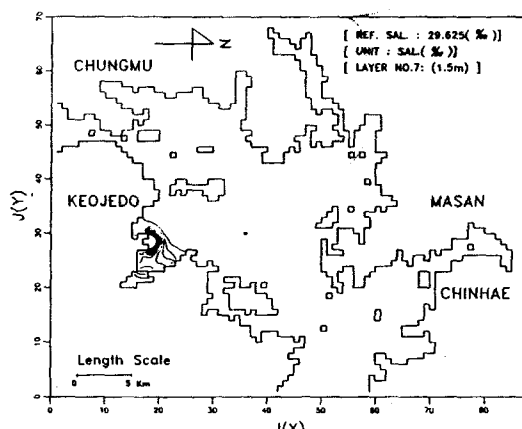
Fig. 9 The water temperature distribution at the (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths on the flood flow under the spring tide



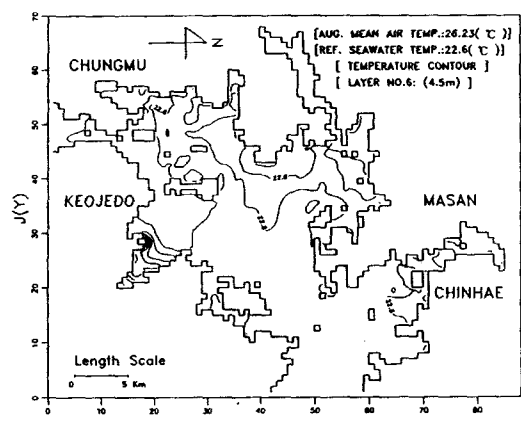
3-D 밀도류모델을 이용한 고온·고염수의 확산 해석



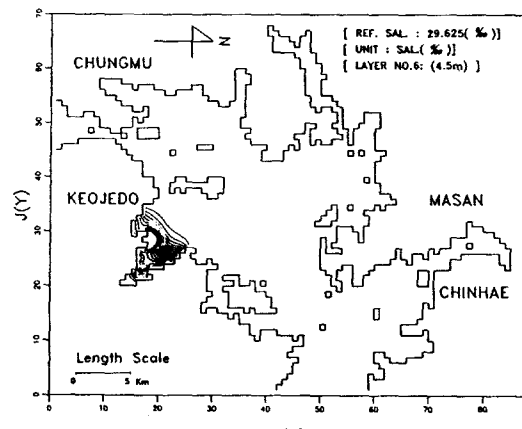
(a)



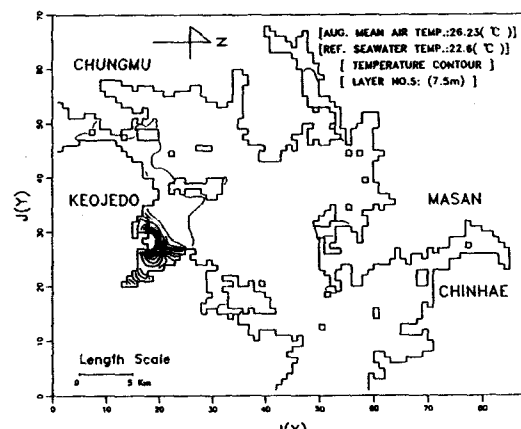
(a)



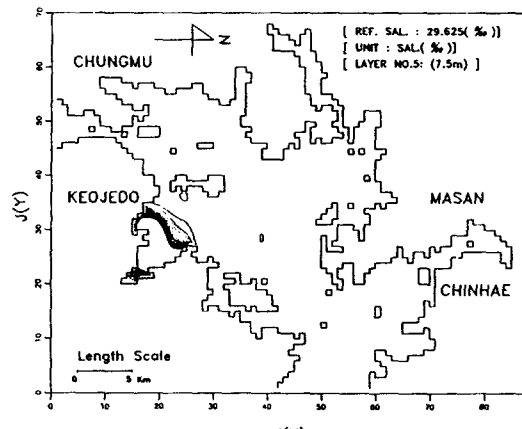
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 10 The water temperature distribution at the (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths on the ebb flow under the spring tide

Fig. 11 The salinity distribution at the (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths on the flood flow under the spring tide

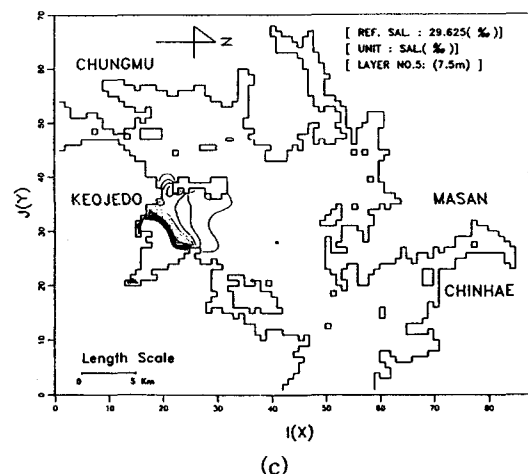
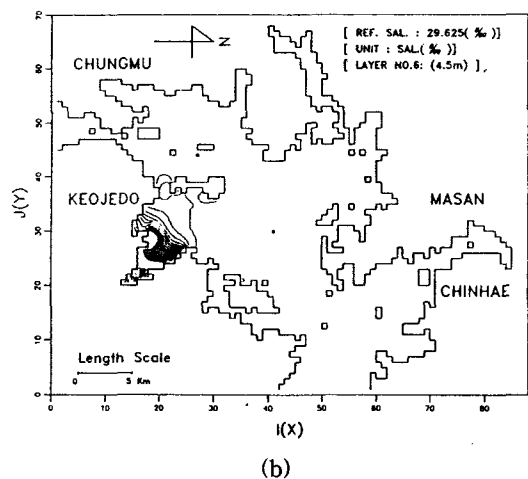
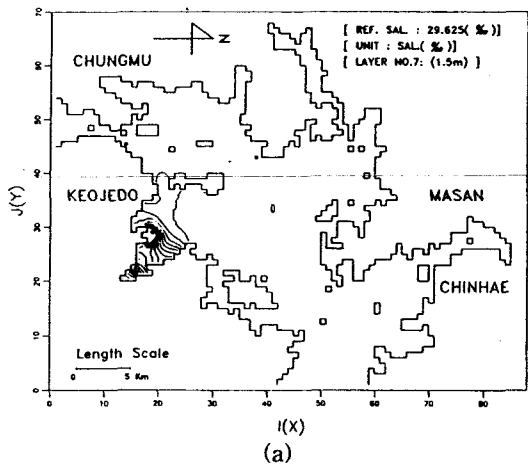


Fig. 12 The salinity distribution at the (a) 1.5m, (b) 4.5m, (c) 7.5m depths on the ebb flow under the spring tide

형성되고 있으며, 환류의 크기는 수심증가와 함께 감소하고 있음을 알 수 있다. 반면, 고온·고염수의 방류로 인하여 배수구 전방해역에서는 진해만 내의 해수에 비하여 밀도가 크기 때문에 방류수는 제2층 및 제3층을 통하여 진해만으로 배출되며, 밀도차에 의하여 발생하는 제 2, 3층의 흐름에 의한 연행작용에 의하여 제1층에서는 방류구를 향하는 흐름이 형성되는 특징을 나타내고 있다.

Fig. 7은 창조류 최강류시의 제1층(1.5 m), 제2층(4.5 m), 제3층(7.5 m)의 유속벡터를 나타낸 것으로 거제도 북쪽수로를 통하여 유입되는 조류 중 일부는 마산만을 향하고 있으나 주 흐름은 진해만을 향하고 있다. 한편, 가조도와 거제도간의 해역에서는 남쪽을 향하는 흐름이 형성되고 있으나, 방류구에서는 제2층 및 제3층의 방류구 주변해역에서의 흐름은 북쪽을 향하고 있으며, 제1층에서는 남쪽을 향하는 하구밀도류의 유동구조와 정반대의 유동특성을 나타내고 있다.

또한 고온·고염수의 방류로 인하여 낙조류 최강류시에도 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 제2층 및 제3층을 통하여 배수되고 있으며, 이 배출수의 영향을 받아 제1층에서는 방류구를 향하는 흐름이 형성되고 있는 특성을 나타내었다.

#### 4. 고온·고염수의 확산특성

해상복합시험플랜트(BMP)의 가동에 따라 1일 필요로 하는 담수량은 50 m<sup>3</sup>이므로, 1일 100 m<sup>3</sup>채수한 해수는 담수화과정에서 수온은 12.4 °C 증가하며, 염분은 29.625 ‰ 증가한다<sup>2)</sup>. 따라서 담수화과정에서 발생하는 고온·고염수가 주변해역의 해양물리학적 해양환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 배수구의 수심이 9 m인 배수구를 통하여 50 m<sup>3</sup>/day 방류하였을 경우에 대하여 수치계산을 실시하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10에 나타낸 수온분포는 기준해수수온을 기준으로 0.2 °C씩 증가하는 등수온선으로 나타내었고, Fig. 11 및 Fig. 12에 나타낸 염분분포는 기준해수의 염분을 기준으로 0.1 ‰씩 증가하는 것으로 나타내었으며, 각 조시별 및 수심별로 나타내었다.

Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 창조류 최강류시에는 표층(1.5 m)에서의 0.4 °C 수온상승범위는 배수구로부터 10 km 떨어진 해역까지 미치고 있으나, 0.6 °C 수온상승범위는 배수구로부터 1 km내외의 고현항내의 해역에 한정되고 있음을 알 수 있다. 그러나 제2층(수심 4.5 m) 및 제3층(수심 7.5 m)의 수온분포를 보면, 낙조 최강류시 표층의 수온상승 범위에 비하여 창조류의 영향을 받아 그 영향범위가 매우 축소되고 있음을 알 수 있다.

결과 중 최대수온상승범위는 낙조류 최강류시(Fig. 10)에 나타났으며, 이 중 표층(1.5 m)에서의 0.6 °C 수온상승범위는 배수구로부터 500 m 떨어진 해역에서 고현항 내측해역에 한정되었으나, 0.4 °C 수온상승범위는 가조도 북쪽·서쪽해역까지 확산되고 있음을 알 수 있다. 그러나 제2층(수심 4.5 m) 및 제3층(수심 7.5 m)의 수온분포를 보면 표층의 수온상승량 및 범위에 비하여 그 영향범위가 매우 작게 나타났으며, 이는 수온의 확산속도가 크기 때문에 수온 상승역은 배수구 인근해역에 한정되고 있음을 알 수 있었다.

창조류 최강류시의 염분분포를 나타낸 것이 Fig. 11로서, 표층(1.5 m)에서의 0.2 ‰ 염분상승범위는 배수구로부터 1 km 이내의 해역에 한정되나, 제2층 및 제 3층에서는 0.2 ‰ 염분상승범위는 배수구로부터 3.5 km 떨어진 해역까지 확산되고 있음을 알 수 있다. 염분 또한, 최대염분의 확산범위는 낙조류 최강류시(Fig. 12)에 나타났으며, 이 중 표층(1.5 m)에서의 0.2 ‰ 염분의 상승범위는 배수구로부터 3 km 떨어진 해역까지, 제2층 및 제3층에서는 배수구로부터 약 3.5 km 떨어진 해역까지 확산되어 표층보다 제2층 및 제3층에서의 염분상승범위가 크게 나타나는 특징을 나타내었다.

수온의 수심별 분포역과는 달리, 염분분포의 경우에는 낙조류 및 창조류시의 염분의 확산범위에 있어서는 큰 차는 볼 수 없었다. 이는 염분의 경우,

수온에 비하여 확산속도가 100배정도 작고 밀도차에 의해 하강류가 형성되어 표층(수심 1.5 m)에서의 염분확산영역 보다 제2층(수심 4.5 m) 및 제 3층(수심 7.5 m)에서의 염분확산영역이 더 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이상의 결과로부터 배수구로부터 50 m<sup>3</sup>/day의 고온·고염해수의 방류로 인하여 진행만 내의 해양물리학적환경에는 그다지 큰 영향은 미치지 않을 것이다. 그러나 장기간에 걸쳐 고온·고염수가 방류될 경우에는 수온상승 및 염분증가가 진행만 내의 방류구 주변해역의 해양생태계에 지대한 영향을 미칠 수 있으므로 장래에 해양생태계모델에 의한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 1) 김종인. "오사카만에 하천으로부터의 유입토사의 수송·퇴적기구에 관한 연구", 공학박사학위논문, p.160, 1997
- 2) 한국기계연구원, 해상플랜트 실험장 적지조사보고서. p.134, 1997
- 3) 岩佐義朗, 井上和也, 呵部徹, "琵琶湖湖流の3次元的な解析", 京都大學防災研究所年報, 第26号, B-2, pp.531~542, 1983
- 4) 彬ノ原伸夫, 大西行雄, "環境科學として海洋學2", 數値解析(第 15章), 東京大學出版會, pp.234~271, 1987
- 5) 村上眞裕美, 大西行雄, 原島省, 國司秀明, "Seto 内海における水溫, 鹽分分布のSimulation", 沿岸海洋研究ノート, Vol. 15, No. 2, pp.130~137, 1987