

## 부유식 해수유동제어구조물의 유동제어 특성에 대한 연구

부 성 윤\*  
(99년 2월 23일 접수)

### A Study on the Thermal Fields Control using a Floating-type Current Control Structure

Sung-Youn Boo\*

**Key Words** : Current Control Structure(해수유동제어구조물), FDM(유한차분법), Multi-Level Model(다층모델), Floating Structure(부유 구조물), Warm Water Spreading(온배수 확산)

#### Abstract

Warm or waste water discharged from offshore-based facilities often causes environmental pollution as it is transported to coastal area due to tidal actions. In this research a floating-type current control structure is introduced in order to reduce the pollutant spreading in the coastal area. Effectiveness of the structure is investigated through the numerical experiment which is based on a 3-D finite difference multi-level scheme. The warm-water spreading in the bay is reduced when the draft of the structure increases and its optimum draft is found to be between  $0.25h$  and  $0.65h$ , where  $h$  is the water depth. The proposed structure is also tested in the Gohyun Bay and it is proven to be applied to controlling pollutant spreading if its draft is properly chosen.

#### 1. 서 론

해안에 인접한 시설물 등에서 발생한 오염원이 강이나 하수구를 거쳐 바다로 배출될 경우 연안에 환경오염을 야기할 수 있다. 그리고 육상의 시설물이 해상에 설치될 경우에도 구조물 주위 환경은 항상 오염에 노출되어 있다고 할 수 있다. 특히 해상 담수화 설비에서 담수과정을 거친 배출수는 고온 고염수이기 때문에 배출수의 처리가 문제가 된

다. 그러므로 이러한 오염원이 배출될 경우 주변 연안에 영향을 미치지 않도록 하기 위해서는 별도의 오염제어구조물이 필요하다. 해수유동제어구조물은 강제로 해수유동을 촉진시켜 수질을 개선하기 위한 구조물과 유동을 제한시켜 오염확산을 감소시키기 위한 구조물로 크게 구분할 수 있다. 잘 알려진 작령공(seabed channel), 도류제(flow guider), 순환류 발생공(flow circulator) 등은 전자의 해수순환 촉진 구조물이라고 할 수 있다. 그러

\* 종신회원, 해군사관학교 조선공학과

나 이러한 구조물은 주로 잠제(submerged structure)의 형태로 설치되므로 해면으로 배출되는 온수 등의 오염원의 확산을 제어하기에는 부적절하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 오염원의 확산을 제어하기 위한 해수유동제어 구조물로서 부유식 구조물을 선정하였으며, 이 구조물을 오염원의 배출지점 주위에 설치하여 오염 확산의 제어특성을 수치실험을 통하여 도출하였다.

해수유동과 관련한 연구는 일반적으로 원전과 같은 육상시설에서 바다로 배출되는 온배수의 확산<sup>1)</sup>이나, 또는 해상 선박사고로 인하여 발생한 유출유의 확산예측<sup>2)</sup>에 주로 초점을 맞추어 왔다. 그런데 최근에 국내외에서 해양공간이용 대형복합플랜트<sup>3)</sup>와, 해상공항<sup>4)</sup> 등의 대형구조물을 설치하기 위한 연구가 진행되어 왔고, 이와 관련하여 발생할 수 있는 연안환경변화의 문제점이 제기되었다. 대형구조물이 없는 경우 만이나 연안의 수질은 그 해역의 폐쇄성 정도에 따라 좌우될 수 있다. 만의 폐쇄성이 큰 경우 해저에 V형상의 구조물<sup>5)</sup>을 설치하여 연직순환을 촉진하거나 해저의 조도를 인공적으로 변화시킬 수 있는 제어 구조물을 설치하여 잔차류를 발생시키는 등의 기법<sup>6)</sup>을 사용하여 수질을 개선하는 방법이 개발되었다. 대형구조물이 설치된 경우 만과 구조물의 제원을 적절히 고려한 도류제<sup>7)</sup>를 이용하여 만의 순환을 개선하는 방법도 알려져 있다. 이러한 순환촉진 구조물과는 달리 본 연구에서 채택한 유동제어구조물은 고온 고염수의 수평확산을 억제하기 위한 부유식구조물로서 구조물의 흡수가 중요한 제어변수가 되므로 수치해석적 방법을 통하여 이를 검토하였다.

해수유동 수치해석 모델링을 위하여 3차원 유동 운동방정식과 열 및 염도 확산방정식을 유한차분법으로 이산화하였다. 그리고 연직방향으로는 다층 모델(multi-level model)<sup>8)-9)</sup>을 도입하였으며 해수 유동에 광범위하게 이용되는  $\sigma$ 좌표 기법<sup>1),10)</sup>은 복합 부유구조물이 존재하는 경우 사용이 용이하지 아니하므로 채택하지 아니하였다. 해수유동 경계조건에 추가하여 부유구조물 주변의 온도와 염도의 이송과 확산에 대한 경계조건을 적절히 부과하였으며, 해면과 대기와의 열교환량을 수치적으로 계산하여 해면경계조건식에 활용함으로써 제어구조

물에 의한 계절별 온수의 확산 제어효과를 고려하였다.

수치실험을 수행하기 위하여 대상해역의 중앙부근 해면에 고온 고염수의 오염원이 해상 담수화 설비 등에서 배출된다고 가정한 후 부유식 유동제어 구조물을 오염원 주위에 설치하였다. 구조물의 길이는 대상해역에 따라 조정하였고, 적정 흡수는 이상해역의 실험으로부터 도출하였다. 그리고 실제해역인 거제도 부근의 고현만에 적용하여 오염확산 제어효과를 검토하였다.

## 2. 수치계산 모델링

### 2.1 지배방정식

해수유동 지배방정식을 정립하기 위하여 다음과 같은 두가지 가정을 하였다. 즉 연직가속도가 중력 가속도 보다 작다는 가정하에 연직방향 운동방정식을 정수압 근사화 하고, 밀도차가 중력가속도에 곱해지는 경우를 제외하고는 나머지항을 무시하는 Boussinesq 가정을 도입한다. 평균자유표면에 위치한 직각좌표계에서  $x-y$  평면을 평균 자유표면에 놓고, 또한 연직 상방향을  $z$ 축의 양으로 택한다. 그리고 해역의 동향과 북향을 각각  $x$ 축과  $y$ 축의 양의 방향으로 정한다. 이러한 좌표계에 대하여 위의 가정에 의한 연속방정식은 다음과 같은 비압축성 유체에 대한 식,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

이 되고,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축의 방향의 운동방정식은 각각

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fu + E_\kappa \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + E_\nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - fu + E_\kappa \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + E_\nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \quad (4)$$

으로 표현할 수 있다. 위의 식 (1)-(4)에서  $\frac{D}{Dt} = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$ ,  $u, v, w$ 는  $x, y, z$  방향의 속도성분,  $f$ 는 코리올리 상수,  $\rho_0$ 는 해수의 대표밀도,  $\rho$ 는 해수밀도,  $E_h, E_v$ 는 수평방향 및 수직방향 와(eddy) 동점성계수,  $p$ 는 압력이다.

그리고 해수 온도와 염도의 확산방정식은

$$\frac{DT}{Dt} = D_h \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + D_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{DS}{Dt} = D_h \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + D_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (6)$$

으로 표현된다. 여기서  $D_h$  와  $D_v$ 는 수평 및 수직 방향 와확산계수이다. 해수의 밀도는 온도  $T$ 와 염도  $S$ 의 함수로 다음의 상태방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$\rho(T, S) = 1028.152 - 0.0735T - 0.004691T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (7)$$

식(2)-(3)과 (5)-(6)의 연직방향 와동점성계수와 와확산계수는 각각

$$E_v = E_{w0} \times \frac{1}{(1 + 5.2R_i)}$$

$$D_v = E_{w0} \times \frac{1}{(1 + 0.33R_i)} \quad (8)$$

로부터 계산할 수 있다. 여기서  $E_{w0}$ 는 중립(균질유체) 상태의 연직 와동점성계수이고,  $R_i$ 는 Richardson 수로서 다음과 같이 표현된다.

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} / \left( -\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \quad (9)$$

## 2.2 경계조건

해수유동 해석을 위한 경계조건은 속도와 수면에 관한 조건과 온도와 염분의 확산에 관련한 경계조건 등의 두 가지로 구분된다.

자유표면, 즉 해면에서의 해수의 속도장 등에 관련한 경계조건은

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w = 0 \quad (10)$$

$$E_v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{xw}}{\rho_0}, E_v \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{yw}}{\rho_0} \quad (11)$$

$$\tau_{xw} = C_{10} \rho_a u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$$

$$\tau_{yw} = C_{10} \rho_a v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$$

이다. 여기서  $\zeta$ 는 해면의 변위,  $\tau_{xw}, \tau_{yw}$ 는  $x, y$  방향의 바람 마찰 전단응력,  $C_{10}, \rho_a$ 는 공기의 항력계수와 밀도,  $u_w, v_w$ 는 바람의 수평방향 속도성분이다. 그리고 해수의 온도와 염분에 대한 조건은 다음의 식과 같다.

$$E_v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_T}{\rho_0 C_p}, E_v \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{Q_S}{\rho_0} \quad (12)$$

여기서  $Q_T, Q_S$ 는 대기와 해면 사이의 단위면적 및 단위시간당 열 및 염분 교환량,  $C_p$ 는 해수의 정압비열을 나타낸다.

해저면에서의 경계 조건은

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \quad (13)$$

$$E_v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{xb}}{\rho_0}, E_v \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{yb}}{\rho_0} \quad (14)$$

$$\tau_{xb} = \gamma \rho_0 u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}, \tau_{yb} = \gamma \rho_0 v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

이다. 여기서  $\tau_{xb}, \tau_{yb}$ 는  $x, y$ 방향의 해저면 마찰 전단응력,  $\gamma$ 는 해저 마찰계수,  $u_b, v_b$ 는 최하층의 수평방향 유속성분,  $h$ 는 수심이다. 그리고 해저에서는 온도와 염분의 유입이 없다고 가정한다.

개방경계면에서는 조위(tidal elevation)가 아래와 같이 조화함수로 주어지고 경계면에 수직인 방향의 속도구배는 0이라는 조건을 사용한다.

$$\zeta(x, y, t) = \zeta_0 \sin \frac{2\pi}{T_0} t \quad (15)$$

여기서  $T_0, \zeta_0$ 는 조석 주기와 진폭이다. 시뮬레이션 초기( $t=0$ )의 조위와 유동장의 속도는 전체 계산 영역에 걸쳐

$$\zeta(x, y, 0) = 0 \quad (16)$$

$$u(x, y, z, 0) = v(x, y, z, 0) = w(x, y, z, 0) = 0 \quad (17)$$

을 가정하며, 변조(modulation) 함수  $f_m$ 를 도입하여 개방경계면의 조위를 점진적으로 증가시키으로써 해역의 유동장이 서서히 발생하도록 한다. 개방경계면에 주어지는 변조된 조위  $\zeta_m$ 은

$$\zeta_m(x, y, t) = f_m \zeta(x, y, t) \quad (18)$$

으로 계산하고, 변조함수  $f_m$ 은 초기조건을 만족하는 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_m = \begin{cases} \frac{1}{2} [1 - \cos(\frac{\pi t}{T_m})], & t < T_m \\ 1, & t \geq T_m \end{cases} \quad (19)$$

변조시간  $T_m$ 은  $0.5T_o \leq T_m \leq T_o$ 의 값으로 시물레이션 초기에 시물레이션의 불안정성이 발생하지 않도록 적절히 택한다. 개방경계면에서의 온도와 염분은 측정치가 있을 경우 측정값을 이용하지만 그렇지 못할 경우 유속의 방향에 따라 개방경계면에서 가장 가까운 내부점의 온도 ( $T_i$ )와 염도 ( $S_i$ ), 그리고 경계면에서의 초기값 ( $T_r, S_r$ )을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$T_{open} = \alpha T_i + \beta T_r, \quad (20)$$

$$S_{open} = \alpha S_i + \beta S_r, \quad (21)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 0과 1사이의 값을 갖는 가중인자로서 해수가 개방경계면을 통하여 빠져나가는 경우  $\alpha=1, \beta=0$ , 그 반대의 경우는  $\alpha=0, \beta=1$ 로 정한다. 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 적절히 조정하여 온도와 염분의 조건을 부과할 수 있다.

육지와의 폐경계면에서는 경계면의 접선방향의 속도는 nonslip조건을, 경계면의 법선방향의 속도 성분은 0으로 한다. 그리고 폐경계면과 수직인 방향으로의 수위의 구배(gradient)도 0으로 한다. 그리고 폐경계면을 통한 열 및 염분의 구배도 0으로 취한다.

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = \frac{\partial S}{\partial \hat{n}} = 0 \quad (23)$$

여기서  $\vec{u}, \vec{n}$ 은 수평방향의 유속벡터와 법선벡터,  $\hat{n}$ 은 개방경계면의 법선방향이다.

### 2.3 부유식 구조물의 경계조건

연안에 설치한 해수유동제어 구조물에는 내만의 해수순환 촉진구조물, 부유식 방파제 겸용의 구조물 등 다양한 목적의 구조물을 고려할 수 있다. 이러한 구조물의 폭(breadth)은 고려하는 해역의 제원에 비하여 매우 작기 때문에 평판형 구조물로 가정할 수 있다. 만약 흘수가  $d$ 인 부유구조물이 Fig. 1처럼 설치될 경우 구조물의 법선방향, 즉  $x$ 방향의 속도성분만 0으로 취하고 접선방향( $y, z$  방향)의 유동은 허용하도록 한다. 그리고 구조물의 폭이 작다고 가정하였으므로 구조물 전후면의 조위의 차를 무시한다. 온도와 염도의 경우 구조물을 가로지르는 유동이 존재하지 아니하므로 식(5)-(6)에서 법선방향의 이송항과 확산항을 0으로하고, 접선방향의 이송 및 확산항을 고려한다. 따라서 Fig. 1과 같은 구조물의 경우 온도와 염도의 이송 및 확산은  $y$ 와  $z$  방향으로만 발생한다. 구조물의 형상과 배치 형태가 다양할 경우 이상에서 기술한 방법을 적절히 응용함으로써 부유식 유동제어구조물에 대한 경계조건을 부과할 수 있다.

### 2.4 유한차분 다층(multi-level) 모델링

해수의 운동방정식과 온도 염도 확산 방정식을 three-time level 유한차분 양해법으로 이산화하였다. 그리고 연직방향으로는 다층모델 기법<sup>8)</sup>을 적용하였으며, 비선형 이송항의 경우 비균일 격자계에서의 1차 상류차분 기법을 이용하였으며 유한차분 격자는 해의 안정성을 위하여 엇갈림 격자를 사용하였다. 시간 증분은 표면중력과 연직유동류를 구분하여 CFL(Courant-Friedrich-Lewy) 조건식으로부터 구하였다.

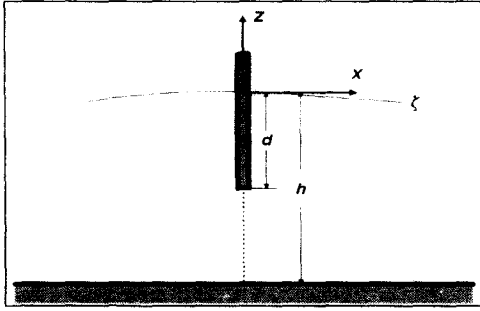


Fig. 1 Schematics of a floating flow-control structure

### 3. 해면의 열교환량

해면경계조건식 중에서 식(12)의 첫째항에 포함된 대기와 해면과의 열교환량은 일반적으로 다음의 식을 이용하여 계산이 가능하다.

$$Q_T = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e) \quad (24)$$

여기서  $Q_T$  ( $kcal/m^2 \cdot sec$ )는 열교환 총량,  $Q_s$ 는 해수에 흡수되는 태양복사량,  $Q_b$ 는 해표면에서 대기로 방사되는 장파복사량,  $Q_c$ 는 해표면과 대기의 현열수송량,  $Q_e$ 는 해수의 상변화에 의한 증발 잠열량이다. 위에 기술한 각각의 열량은 다양한 방법으로 계산할 수 있으며 여기서는 다음과 같은 식을 이용하였다.

#### 3.1 태양복사량(solar radiation)

태양의 복사량이 해면에 흡수되는 태양복사량  $Q_s$ 는 중위도 해역의 경우 다음의 식으로 구할 수 있다<sup>12)</sup>.

$$Q_s = 0.93(1 - 0.67 n_c)Q_0 \quad (25)$$

구름의 양을 나타내는  $n_c$ 는  $0 < n_c < 1$ 의 값이고, 완전 청천시의 일사량  $Q_0$ 는 계절과 위도에 따라 달라지게 된다.

#### 3.2 장파복사량(long wave radiation)

해면에서 대기 방향으로 방사되는 장파복사량

$Q_b$ 은 중위도 해역의 경우 다음의 식으로 구할 수 있다<sup>13)</sup>.

$$Q_b = 1.32 \times 10^{-11} \theta_w^4 \{0.49 - 0.066\sqrt{e(T_a)}\} (1 - 0.65 n_c^2) + 5.27 \times 10^{-11} \theta_w^3 (T_w - T_a) \quad (26)$$

여기서  $T_w$ 는 해면의 온도,  $T_a$ 는 해면 위의 대기의 온도,  $\theta_w = 273 + T_w$ ,  $e(T_a)$ 는 기온  $T_a$ 에서의 증기압을 나타낸다. 만약 증기압  $e$ , 포화증기압  $e_s$ , 해면의 기압  $p$ 가  $e \ll p$ ,  $e_s \ll p$ 의 관계를 가정할 경우  $e(mb)$ 는 상대습도  $f_h$ 의 관계식<sup>14)</sup>으로부터

$$e = f_h e_s \quad (27)$$

가 된다. 그리고 임의 온도  $T(^{\circ}C)$ 에서의 포화증기압  $e_s(mb)$ 는

$$e_s = 6.1078 \times 10^{17.5T/(273+T)} \quad (28)$$

를 이용하여 계산할 수 있다. 만약 이슬점온도  $T_{dew}$ 가 주어질 경우  $e$ 는 식(28)의  $T$  대신  $T_{dew}$ 를 대입하여 구할 수도 있다<sup>14)</sup>.

#### 3.3 현열수송량(sensible heat transport)

현열수송량  $Q_c$ 은 공기밀도  $\rho_a$ , 공기정압비열  $C_{pa}$ , 현열수송계수  $C_H$ , 해면위 10m에서의 풍속  $U_{10}$ 을 이용하여 다음의 식으로부터 계산할 수 있다<sup>15)</sup>.

$$Q_c = \rho_a C_{pa} C_H (T_w - T_a) U_{10} \quad (29)$$

공기밀도<sup>11)</sup>  $\rho_a$  ( $kg/m^3$ )와 공기의 정압비열<sup>15)</sup>  $C_{pa}$  ( $kcal/kg \cdot ^{\circ}C$ )는

$$\rho_a = 1.293 \frac{273}{273 + T_a} \cdot \frac{p}{1013.25} \cdot (1 - 0.378 \frac{e}{p}) \quad (30)$$

$$C_{pa} = 239.8985(1 + 0.8375 q_a) \quad (31)$$

$$q_a = 0.622 \frac{e_a}{p} \quad (32)$$

을 이용하여 구하였으며,  $q_a$ 는 공기 비습(air humidity)이다.

### 3.4 증발 잠열량(latent heat transport)

해면에서 증발에 의한 잠열 수송량  $Q_e$ 는 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.<sup>15)</sup>

$$Q_e = \rho_a L_E C_E U_{10} (q_s - q_a) \quad (33)$$

여기서 해면에서의 포화비습  $q_s$ 와 해수의 증발 잠열  $L_E$ 는 다음의 식과 같다.

$$q_s = 0.622 \frac{e_s}{p} \quad (34)$$

$$L_E = 0.5972 \times 10^6 - 0.5492 \times 10^3 T_w \quad (35)$$

## 4. 수치계산 결과 및 검토

### 4.1 이상해역(ideal sea)에서의 수치실험

우선 길이와 폭이 각각 10 km, 수심이 20 m로 정방형 만(square-shaped bay)을 가정하였다. 이 만의 수평방향 격자는 500m, 연직방향 격자는 2m로서 정방격자를 사용하였다. 이 만의 개방경계면은 동쪽으로 이 경계면에서 12시간 주기의 진폭 0.5m의 조위가 발생하도록 하였고, 또한 시뮬레이션 초기의 조위의 변조주기를 6시간으로 택하였다. 그리고 수평 및 연직방향 와동점성계수는 각각 100과 0.005 m<sup>2</sup>/sec을 사용하였으며, 바람의 영향은 고려하지 아니하였다. 기타의 조석유동 해석에 관련된 입력자료는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Parameters for tidal field calculation

Parameters	Data		Remarks
	Square Bay	Gohyun Bay	
$f$ [sec <sup>-1</sup> ]	0	0	Corioli parameter
$g$ [m/sec <sup>2</sup> ]	9.81	9.81	gravitational accel.
$E_h$ [m <sup>2</sup> /sec]	100	100	horiz. eddy visco.
$E_{10}$ [m <sup>2</sup> /sec]	0.005	0.005	vert. eddy visco.
$\rho_o$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1025	1025	reference density
$\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.25	1.25	air density
$\gamma$	0.0026	0.0026	bottom fric. coeff.
$C_{10}$	0.0026	0.0026	surface fric. coeff.
$T_o$ [hrs]	12	12	tidal period
$\zeta_o$ [m]	0.5	0.62	tidal amplitude
$\Delta x = \Delta y$ [m]	500	500	horiz. mesh size
$\Delta z$ [m]	2	2-3	vert. mesh size
$\Delta t$ [sec]	5	5	time increment
N	11	10	number of levels
$T_{dis}$ [°C]	30	30	disch. water temp.
$S_{dis}$ [%]	32	40	disch. water sal.
$Q_{dis}$ [m <sup>3</sup> /sec]	1	1	disch. volume

이 해역의 초기 해수와 염도는 하절기를 가정하여 25°C와 32‰를 사용하였고 수심방향의 초기 온도와 염도의 차이는 없다고 가정하였다. 대기와 해면과의 열교환 및 염분 교환량은 서로 평형을 이루었다고 가정하였다. 이 경우 식(12)는

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (36)$$

으로 나타낼 수 있으며, 이 식을 이용하여 해면 위의 층(level)의 온도와 염도의 경계조건 값을 구하였다. 이 정방형 만의 대략 중간지점, 즉  $(x, y) = (4km, 5km)$ 인 위치에서 온도 30°C, 염도 32‰의 온수가 1m<sup>3</sup>/sec의 양으로 해면으로 방출된다고 가정하였다.

온수에 의한 만의 오염을 제어하기 위하여 온수의 방출지점 주위에 부유식 유동제어구조물을 설치하였다. 구조물의 남북방향 길이는 3 km, 동서방향 길이는 1.5 km이고 흘수는 해저까지 연장할 수 있도록 하였다.

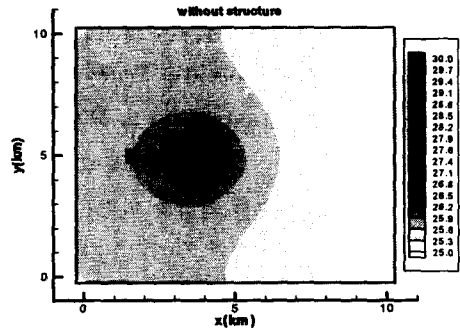


Fig. 2 Surface temperature contour without structure at t=108 hrs in the square bay

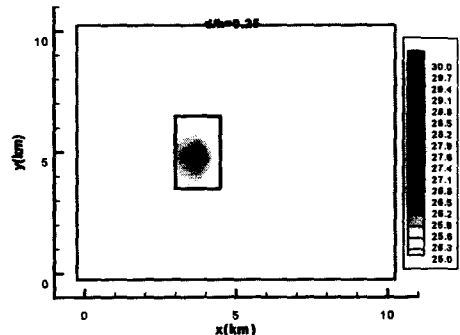


Fig. 3 Surface temperature contour with structure of d/h=0.25 at t=108 hrs in the square bay

위에서 기술한 조건을 사용하여 108시간 동안 시뮬레이션한 결과를 Fig. 2-3에 도시하였다. Fig. 2는 유동제어구조물을 설치하기 이전의 온도의 분포를 나타낸 것으로 개방경계면의 반대편, 즉 서쪽 연안에 방출온수의 영향이 크게 나타나고 있다. 구조물의 흘수의 깊이에 따른 유동제어 특성을 검토하기 위하여 구조물의 흘수( $d$ )와 수심( $h$ )의 비,  $d/h=0.25$ 인 유동제어구조물을 설치하였을 경우의 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 제어구조물의 설치 이전(Fig. 2)과 비교하여 온수의 확산의 상당히 제어되었으며, 특히 구조물의 흘수가 증가할수록 온수의 확산이 감소함을 알 수 있다.

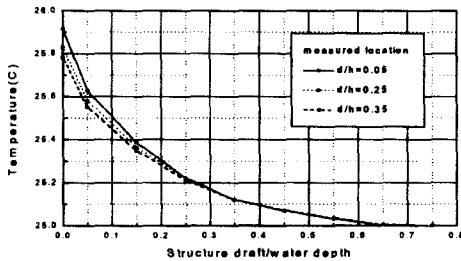


Fig. 4 Temperature variations at the three depthwise-locations below the point B depending on the ratio of structure draft and water depth in the square bay

Fig. 4는 제어구조물의 흘수가  $d/h=0$ 에서 0.75까지 증가하면서 서쪽연안에서 1.5km떨어진 B 지점(Fig. 2 참조)의 수심방향으로 3 위치, 즉  $d/h=0.05, 0.25, 0.35$ 에서 측정된 값을 도시하였다. 구조물의 흘수가 낮을수록 수심방향의 온도차가 발생하고 제어효과도 미약함을 알 수 있다. 그리고 구조물의 흘수가  $d/h=0.25$ 부터 수심방향의 온도차가 거의 없어지면서 유동제어효과가 나타나고, 특히  $d/h=0.65$  이상에서는 해수의 온도가 초기의 온도  $25^{\circ}\text{C}$ 를 유지함으로써 오염확산을 완전히 제어하는 효과를 보여주고 있다. 따라서 오염확산을 억제하기 위한 유동 제어구조물의 흘수는  $d/h$ 가 0.25~0.65 정도되는 것이 바람직하나 흘수가 커질 경우 조류력이 증가하여 구조물의 유지유지의 문제점이 발생할 수 있다. 그러므로 제어효과가 나타나기 시작하는  $d/h=0.25$ 를 제어구조물의 적정 흘

수로 정하여 실제 해역에 적용하기로 하였다.

#### 4.2 고현만에서의 수치실험

이상해역의 수치실험을 통하여 얻어진 부유식 해수유동제어구조물을 실제해역에 설치하여 효과를 검토하였다. 대상해역으로 거제도 부근의 고현만을 선택하였다. 수치모델링을 위하여  $x, y$  방향으로는 500m의 정방격자를 사용하였다. 그리고 연직방향으로는 수심에 따라 층의 수를 달리하였고, 최대수심에 대하여 10개의 층(level)을 배치하였다. 격자의 크기는 1~8번 층까지는 2 m, 그 이상은 3 m의 가변 층을 사용하였다. 이 만에는 2개의 개방경계면이 있으나 진해만 방향인 북쪽 경계면에서 12시간 주기의 진폭 0.62m의 조위가 발생하도록 경계조건을 부과하였다. 그리고 조위의 변조주기와 와동점성계수도 이상해역 실험에서 사용하였던 데이터와 동일한 값을 사용하였다(Table 1 참조).

Table 2 Parameters for thermal and salinity field calculation

Parameters	Summer (August)	Winter (January)	Remarks
$T_a$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	26.0	4.0	air temp.
$T_{i=0}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	25.8	14.0	initial water tem.
$S_{i=0}$ [%]	32.0	34.2	initial water sal.
$D_h$ [ $\text{m}^2/\text{sec}$ ]	100	100	horiz. eddy diff.
$D_w$ [ $\text{m}^2/\text{sec}$ ]	0.005	0.005	vert. eddy diff.
$U_{10}$ [m/sec]	4	4	wind sp., $z=10\text{m}$
$u_w$ [m/sec]	2	2	$x$ -dir. wind sp.
$v_w$ [m/sec]	2	-2	$y$ -dir. wind sp.
$C_p$ [kcal/kg· $^{\circ}\text{C}$ ]	0.93	0.93	specific heat
$p$ [mb]	1013	1013	atm. pressure
$f_h$ [%]	80	80	relat. humidity
$n_c$	0.46	0.52	amount of cloud
$C_H$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	sens. heat coeff.
$C_E$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	latent heat coeff.
$Q_o$ [cal/cm $^2$ ·day]	703.2	348.4	solar rad. under clear sky

온배수 확산, 대기와 해면과의 열교환량 등의 계산에 관련된 입력자료는 Table 2에 나타내었다. 그리고 계절별 온도제어 특성을 검토하기 위하여 대표적으로 하계인 8월과 동계인 1월만을 수치실험 대상에 포함하였다. 이 해역의 8월과 1월의 온도와

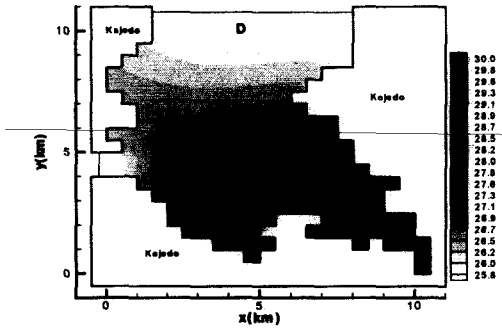


Fig. 5 Surface temperature contour without structure at 108 hrs of flood tide in August

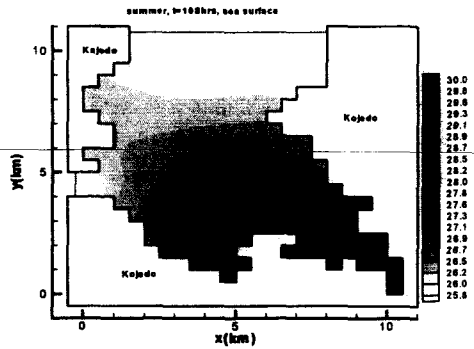


Fig. 6 Surface temperature contour with structure of  $d/h=0.25$  at 108 hrs of flood tide in August

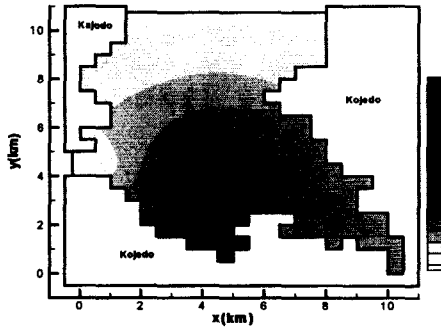


Fig. 7 Surface temperature contour without structure at 102 hrs of ebb tide in January

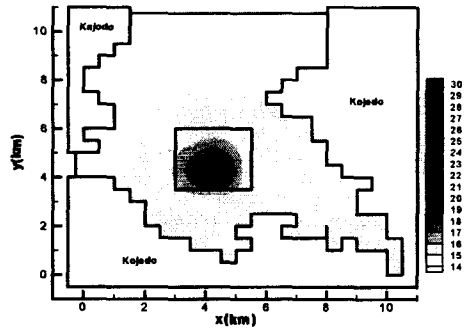


Fig. 8 Surface temperature contour with structure of  $d/h=0.25$  at 102 hrs of ebb tide in January

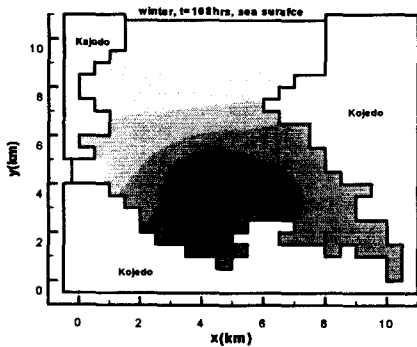


Fig. 9 Surface temperature contour without structure at 108 hrs of flood tide in January

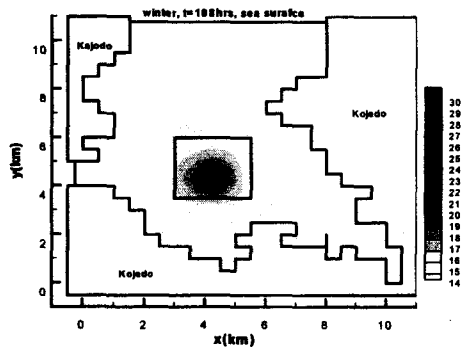


Fig. 10 Surface temperature contour with structure of  $d/h=0.25$  at 108 hrs of flood tide in January



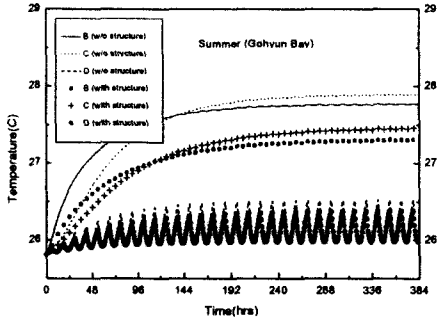


Fig. 11 Surface temperature variations at three locations before and after installation of the structure of  $d/h=0.25$  in August

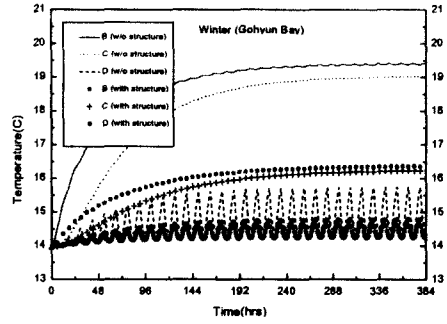


Fig. 12 Surface temperature variations at three locations before and after installation of the structure of  $d/h=0.25$  in January

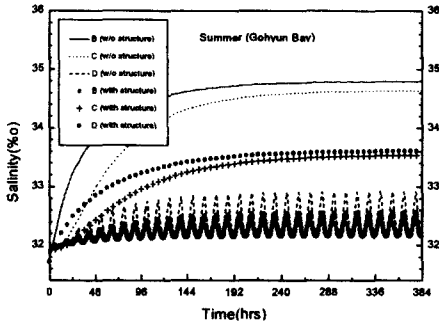


Fig. 13 Surface salinity variations at three locations before and after installation of the structure of  $d/h=0.25$  in August

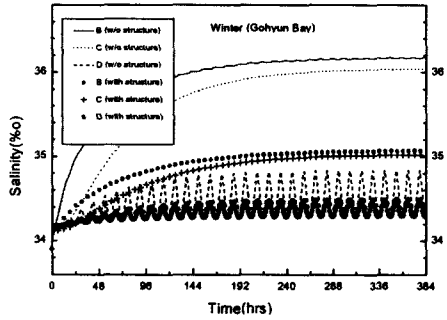


Fig. 14 Surface salinity variations at three locations before and after installation of the structure of  $d/h=0.25$  in January

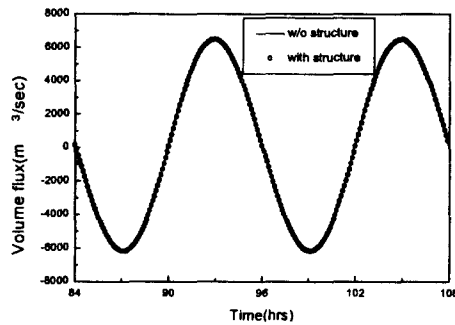


Fig. 15 Total volume flux through the open boundary before and after installation of the structure of  $d/h=0.25$

염도는 JODC의 자료(www.jodc.jhd.go.jp)를, 공기 온도, 운량, 풍속 등은 문헌[15]의 자료를 사용하였다. 완전 청천시의 일일 태양복사량  $Q_0$ 는 문헌[13]에 월별로 주어져 있고, 이중에서 1월과 8월의 고현만의  $Q_0$ 는 위도 35N에 해당하는 값인 348.4 및 703.2 cal/cm<sup>2</sup>·day를 택하여 단위를 환산하여 사용하였다. 그리고 해면과 대기의 염분교환량은 서로 평형을 이루었다는 이상해역에서 사용하였던 것과 동일한 조건을 사용하였다.

고현만의 중앙의 해면으로 방출하는 온배수의 온도와 염도는 30°C와 40‰, 방출량은 1m<sup>3</sup>/sec으로 가정하였다. 그리고 유동제어구조물은 길이 2.5km의 정방형이고 홀수  $d$ 는 이상해역의 실험에서 얻어진  $d/h=0.25$ 를 이용하여 결정하였다. 여기서  $h$ 는 고현만의 평균수심 20m이다.

부유식 해수유동제어구조물의 설치 전후의 실험 결과중 시뮬레이션 시간  $t=102hrs$ (낙조류)와  $t=108hrs$ (창조류)에서의 해면의 온도분포 등곡선을 Fig. 5~10에 도시하였다. 제어구조물의 설치 전(Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9)에는 남쪽연안의 온도상승으로 인하여 오염이 증가하나 설치 후(Fig. 6, Fig. 8, Fig. 10)에는 온도 증가가 둔화되어 오염이 감소되었음을 알 수 있다. 8월의 경우(Fig. 5~6) 제어구조물의 설치 전후의 온도변화가 작아 제어 효과가 다소 미약한 반면 1월의 경우(Fig. 7~10)는 온수의 확산이 구조물에 의해 크게 제어되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 대기와 해면과의 열교환에 의한 영향과 제어구조물의 복합적인 작용에 의한 것으로 판단된다. 그리고 만 입구 부근의 경우 제어구조물 설치전의 낙조류(Fig. 7)와 창조류(Fig. 9)시 만 입구의 온도분포가 다르게 나타나지만, 설치 후(Fig. 8과 Fig. 10)에는 서로 유사한 온도분포를 보여주고 있다.

만내의 위치별로 온도 및 염도 확산 특성을 자세히 검토하기 위하여 3개 지점(Fig. 5 참조), 즉 남쪽 연안(B와 C 지점)과 만 입구(D 지점)의 해면의 온도와 염도를 월별로 Fig. 11~Fig. 14에 비교하였다. 1월과 8월의 초기온도 14°C와 25.8°C, 그리고 초기염도 34.2‰와 32‰를 시작으로 시뮬레이션 증가에 따라 B와 C지점의 온도와 염도가 서서

히 상승하다가 약 10일(240 hrs) 후에는 정상 상태에 도달하고 있다. 온도의 경우(Fig. 11~12) 구조물 설치 전에는 B와 C지점의 온도상승률이 크게 나타나고 있고 특히 8월보다 1월의 경우가 상승률이 더 크다. 그리고 제어 구조물 설치 후에는 B와 C지점의 온도상승률이 둔화되어 유동제어효과가 나타나고 있다. 그리고 겨울의 경우 온도 상승률이 현저히 감소하여 유동제어효과가 여름보다 훨씬 우수하다고 할 수 있다. 또한 만 입구인 D지점에서의 온도는 조석 주기에 따라 진동함을 알 수 있고, 1월의 경우 제어구조물의 설치 전후에 만 입구의 온도 진동 진폭이 크게 나타나고 있다. 염분의 변화(Fig. 13~14)도 제어구조물의 설치 전후의 온도 특성과 매우 유사한 추세를 보여주고 있다. 즉, 제어구조물이 설치될 경우 주변해역으로 고염수가 확산되는 정도가 줄어들고, 만의 입구를 제외한 해역에서는 일정 시간이 지난 후부터 조석운동과 무관하게 염분의 분포가 정상상태에 이르고 있다.

유동제어구조물이 만 내에 설치될 경우에 해수의 흐름이 방해받을 만의 유동을 감소시킬 우려가 있으므로 해수교환량을 검토할 필요가 있다. Fig. 15에 북쪽과 서쪽의 개방경계면을 통하는 해수교환량(volume flux)을 도시하였다. 본 연구에서 채택한  $d/h=0.25$ 의 부유식 유동제어구조물의 설치에 따른 해수교환량은 설치 전과 비교하여 변화가 거의 없다고 할 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

육지에서 해안으로 또는 만에 위치한 해양구조물 등에서 온수 등의 오염원이 배출될 경우 주변 연안이 오염될 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 오염원의 확산을 제어하기 위한 해수유동 제어 구조물로서 부유식 구조물을 선정하였으며, 이 구조물을 오염원의 배출지점 주위에 설치하여 오염확산의 제어특성을 수치실험을 통하여 도출하였다.

수치실험을 위하여 조류유동 운동방정식과 온도 및 염도 확산방정식을 유한차분법을 이용하여 이산화하였고, 연직방향으로는 다층모델 기법을 사용하였다. 그리고 해면과 대기와 열교환량을 수치

적으로 계산하여 해면경계조건식에 활용함으로써 계절별로 온도의 확산과 제어구조물의 제어효과를 고려하였다.

부유식 제어구조물의 적정 흘수 도출을 위하여 우선 이상해역에서의 수치실험을 수행하였다. 그 결과 구조물의 흘수와 수심의 비,  $d/h=0.25$  이상부터 제어효과가 크게 나타나기 시작하고  $d/h=0.65$  이상에서는 완전한 제어효과를 얻을 수 있었다.

이상해역의 실험결과로부터 얻어진  $d/h=0.25$ 의 구조물을 실제 해역인 거제도 부근의 고현만에 설치하여 여름과 겨울별로 오염확산 제어효과를 검토하였다. 제어구조물 설치 전에는 고온 고염수의 배출수 영향으로 연안 오염이 광범위하게 나타났으나 설치 후는 오염 감소효과를 얻을 수 있었으며, 특히 여름보다 겨울에 오염제어 효과가 크게 나타났다. 이러한 일련의 수치실험을 통하여 부유식 해수유동제어구조물을 이용할 경우 오염확산을 제어할 수 있음을 확인하였으며 향후 설계인자 확보를 위하여 보다 세밀한 연구가 요구된다.

본 연구에서 제안한 부유식 구조물은 파랑제어 구조물 등의 다목적구조물로도 활용이 가능하다. 특히 설치와 철수가 용이한 부유식 박막 방파제<sup>16)</sup>(floating membrane breakwater)를 겸한 구조물로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 자유공모과제(과제번호 1997-001-E00120)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) 정태성, 이길성 “연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형”, 한국해양·해양공학회지, 제6권, 제3호, 1994
- 2) 김선영 “해상유출유 확산방지 기술 개발”, 연구보고서, 한국기계연구원, 1996
- 3) 정태영 “해양공간이용 대형 복합플랜트 개발”, 연구보고서, 번호 98-NQ-12-01-A-01, 한국

- 기계연구원, 1998
- 4) Inoue, Y., S. Tabeta, M. Arai & K. Nakazawa, “Feasibility Design of a Floating Airport and Investigation into its Effects on the Environment”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.176, 1994
- 5) Asaeda, T., P.H. Son & S. Armfield, “Vortex Convection Produced by V-Shaped Dihedral Obstruction,” J. Hydraulic Engineering, Vol.120, No.11, 1994
- 6) Yano, S., T. Komatsu, N. Kohashi, K. Fujita, S.-G. Gug, “On the Control of Tidal residual Current in a Bay by Bottom Roughness with Directional Characteristics”, 第1回環境流體 Symposium講演論文集, 1996
- 7) 양찬규, 홍기용 “도류제에 의한 항만내 조류제어 연구”, 한국해양공학회지, 제11권, 제4호, 1997
- 8) 부성운, 홍기용 “유동제어 구조물의 영향에 의한 해수유동 변화 해석”, 대한조선학회 96년도 추계학술대회 논문집, 1996
- 9) Tabeta, S. & M. Fusino, “Numerical Simulation of Currents and Density Variation in Tokyo Bay by Means of Multi-Level Model”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.176, 1994
- 10) 노준혁, 윤범상 “조석 및 바람에 의한 실해역 표층유동의 계산”, 대한조선학회 논문집, 제32권 제2호, 1995
- 11) Fusino, M., H. Kagemoto & T. Hamada, “On the Sea-Covering Effect of a Huge Floating Structure on the Surrounding Water”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.180, 1996
- 12) Kyuzuka, Y., C. Hu, H. Hasemi & A. Hikai, “An Assesment of a Mega-Float on Water Quality and Ecosystem in Tokyo Bay”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.180, 1997
- 13) 横山長之, “海洋環境 Simulation”, 資源環境技術綜合研究所, 白亞書房, 1993
- 14) Hsu, S.A., “Coastal Meteorology”, Academic Press, Inc., 1988

15) Na, J., & J. Seo, "The Sea Surface Winds and Heat Flux in the East Asian Marginal Seas", Dept. of Earth & Marine Sciences,

Hanyang University, 1998

16) Williams, A. N., "Floating Membrane Breakwater", Transactions of ASME, Vol.118, 1996