

하구밀도류와 취송류가 영일만 해수유동에 미치는 영향

윤한삼* · 이인철** · 류청로**

*부경대학교 해양산업개발연구소

**부경대학교 해양공학과

Numerical Prediction of Tidal Current due to the Density and Wind-driven Current in Yeong-il Bay

HAN-SAM YOON*, IN-CHEOL LEE** AND CHEONG-RO RYU**

*Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY-WORD: Yeong-il Bay 영일만, 3D Real-time Numerical Model 3차원 실시간 수치모델, Wind-driven Current 취송류, Estuary Density Current 하구밀도류

ABSTRACT: This study constructed a 3D real-time numerical model that predicts the water quality and movement characteristics of the inner bay, considering the characteristics of the wind-driven current and density current in estuaries, generated by the river discharge from the Hyeong-san river and oceanic water of the Eastern sea. The numerical model successfully calculated the seawater circulation current of Yeong-il Bay, using the input conditions of the real-time tidal current, river discharge, and weather conditions during March 2001. This study also observed the wind-driven current and density current in estuaries that are effected by the seawater circulation pattern of the inner bay. We investigated and analyzed each impact factor, and its relationship to the water quality of Yeong-il bay.

1. 서 론

우리 나라 동남해역에 위치한 영일만의 경우, 해류 작용은 달만갑 전면 해역에서 유입되어 만의 내부와 남쪽 연안을 거쳐서 호미곶 전면 해역으로 유출되며(김중규, 2001; 김헌덕 등, 2001), 이러한 해류의 성격은 형산강의 담수유출 뿐만 아니라(국립해양조사원, 1971), 포항시의 도시하수와 포항제철의 산업 폐수를 회석시키거나 외해로 유출시키는 기능을 가진다(이종섭 등, 1995; 강양순 등, 2002).

일반적으로 영일만과 같은 하구역에서는 하천수, 부유토사 그리고 오염부하 유출과 외해로부터의 조석, 조류(연안류), 파랑, 표사 등의 작용이 공존한다. 이로 인해 만내 수위 및 유속의 주기적 변화, 밀도류의 발생, 부유토사 또는 오염물질의 침전·퇴적 등의 수리현상이 일어난다. 이러한 제현상은 하구역의 유황변화와 오염물질의 만내 침적을 발생시키며, 만내 수질 오염에 복합적인 영향을 미치므로, 하구수리를 취급함에 있어 오염물질의 거동에 미치는 주요 영향인자들의 특성을 비교·분석할 필요성이 강조된 바 있다(윤한삼, 2004).

따라서 윤한삼 등(2003)은 만내로 유입된 오염물질은 외해 유출뿐만 아니라, 만내 침강과 아울러 저층의 고밀도 염분유량에

의해 육지방향으로 운반되어 영양염집적해역(nutrient trap)을 형성시켜 만내 수질오염을 가중시킬 것임을 강조하였다. 또한 영일만 연안수와 외해수의 수온·염분 기준 관측자료를 재해석함으로써 영일만내 수괴의 연직순환류의 발생 메카니즘을 Fig. 1과 같이 모식화하고, 표층에서 형산강 담수의 외해 유출과 저층에서 동해 저온·고염의 고유수가 유입되어 연안 용승작용 현상으로 인해 연안 연직순환류가 발생하는 것으로 제안하였다.

하지만 이상의 연구결과에서는 연직순환류에 미치는 하구밀도류의 영향 및 외해수의 유입거동특성, 대기기상조건(특히 바람장)에 따른 취송류의 영향은 상세하게 검토되지 못한 상황이다. 따라서 영일만내 오염물질의 외해 수송 메카니즘을 규명하기 위해서는 만내 해수유동에 미치는 각각의 영향인자들에 대한 영향정도를 정략적으로 해석할 필요가 있다.

이에 본 연구는 형산강을 통한 담수유입과 영일만내로의 동해 고유수 유입시 하구밀도류 및 바람장의 특성에 따른 수괴의 거동특성을 예측하기 위해 3차원 실시간 해수유동 모형을 구축하고 수치실험을 수행하였다. 실험방법은 만내에 하구밀도류와 취송류가 모두 발생하지 않을 경우(조석류만 존재할 경우, C1), 바람장의 영향으로 취송류만 발생할 경우(C2), 하구밀도류만이 존재할 경우(C3), 밀도류와 취송류 효과가 동시에 발생할 경우(C4)로 구분하였으며, 이를 통해 영일만내 하구밀도류와 취송류가 하구순환류의 발생메카니즘에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

제1저자 윤한삼 연락처: 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6256 yoonhans@pknu.ac.kr

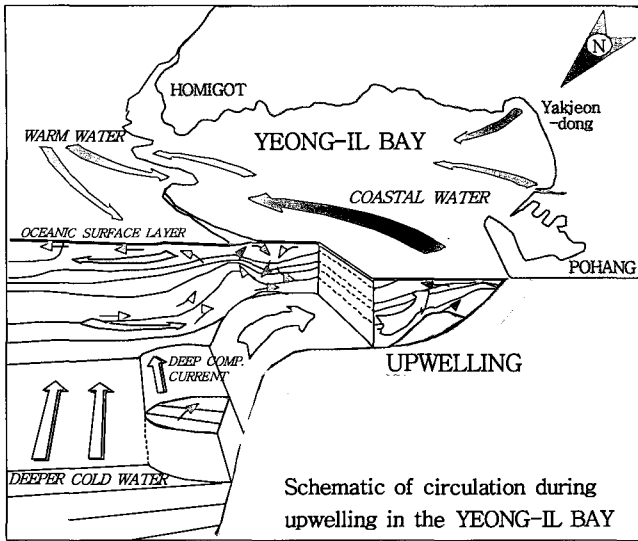


Fig. 1 Development mechanism of vertical circulation current at Yeong-il Bay

2. 자료 및 방법

2.1 주 영향인자

2.1.1 조석류 영향

조석은 계절적인 변동성이 바람 및 하천유량에 비하여 매우 작으며, 주기적이고 지속적인 특성을 가지고 있다. 조석에 의한 혼합은 흐름의 왕복특성으로 하천의 혼합과 구별된다. 지형적인 특성에 따라 창조우세, 낙조우세 또는 평균 흐름양상에 따라 혼합양상이 다양해진다. 조석에 의한 영향은 지형적인 영향과 밀접한 관련이 있으며, 조석의 왕복흐름특성에 의해 tidal pumping(netflow, residual current), tidal trapping(소규모 내만, 만곡부에 오염물질이 체류하는 현상)을 발생시킨다.

2.1.2 바람장 영향

바람은 수표면에 항력(drag force)을 발생시켜 바람이 부는 방향으로 수괴를 이동시키기 때문에 부유물질 또는 기름띠, 온수(warm water) 및 적조 등 표층에 위치한 물질수송에 미치는 영향은 매우 크다. 그러나 이는 바람에 의하여 발생하는 파랑과 순환흐름(취송류, wind-driven circulation flow)에 의한 것으로 연직혼합 및 평면혼합을 야기시키기 때문이다. 따라서 만내 오염물질의 거동예측에 취송류의 영향을 고려하여야 한다. 이러한 바람에 의한 영향은 시기적으로 하계의 태풍 또는 동계의 북서계절풍시 그 영향이 크다(조홍연, 1999).

2.1.3 하천수 영향

하천수의 영향으로는 하천을 통하여 유출되는 담수의 양과 조석 유·출입량 또는 조석 영향이 크지 않은 해역에서는 수역의 해수교환율(공간적인 규모) 및 지속시간에 따라서 결정된다. 특히 담수와 해수의 밀도차로 인해 해수는 담수 하층으로 침입하여 역학적 평형을 이루기 위한 유동현상이 나타난다. 이 흐름을 하구밀도류(estuary density current)라 부르는데, 하구

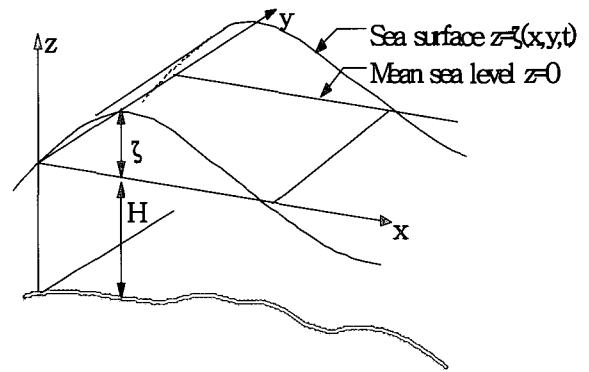
역에서의 담수와 해수의 혼합 상태에 따라 약혼합형, 완전혼합형, 강혼합형으로 대별된다(최성욱, 1999).

2.2 수치모형의 기본방정식

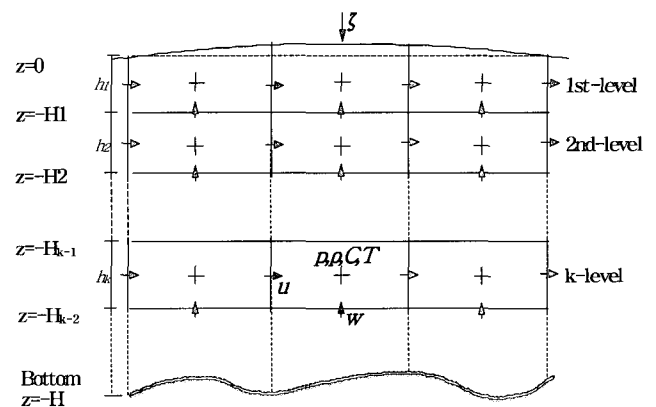
본 연구에 사용되어진 모형은 정수압·부시네스크 근사를 가정한 3차원 Navier-Stokes 운동량 방정식과 연속식, 수온과 염분의 이류확산방정식을 기초방정식으로 한 연직 다층의 level model로서 해수유동의 재현, 외력입력조건으로서 유입부 하량의 계산, 수온·염분의 시공간적 변동특성을 연동 계산할 수 있는 모형이다(Lee et al., 2000a).

모형의 좌표계, 계산층 구분 및 격자계의 체물리량은 Fig. 2와 같으며, 모형내 기본방정식의 이산화에 있어서는 시간항은 전진차분, 이류항과 확산항은 각각 풍상차분과 중앙차분법의 유한차분법을 사용한다. 직교좌표에서 본 연구에 사용될 수치모형의 대표적인 중간층(k층) 지배방정식은 다음식과 같다.

또한 수온(T)과 염분(C)의 계산은 각 층별 선유량과 열 및 염분이온농도에 관한 와동확산 및 연직혼합계수를 고려하여 계산하였다(Lee et al., 2000b).



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Czoordinate system and (b) Vertical grid system and calculation terms in the numerical model

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} + \\ & \frac{(u_{k-1/2} - u_k) \cdot w_{k-1/2} - (u_{k+1/2} - u_k) \cdot w_{k+1/2} - fu_k}{h_k} \\ & = -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2} \\ & + \gamma_i^2 \frac{(u_{k-1} - u_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k} \\ & - \gamma_i^2 \frac{(u_k - u_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2}}{h_k} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + \\ & \frac{(v_{k-1/2} - v_k) \cdot w_{k-1/2} - (v_{k+1/2} - v_k) \cdot w_{k+1/2} - fv_k}{h_k} \\ & = -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P_k}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \\ & + \gamma_i^2 \frac{(v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k} \\ & - \gamma_i^2 \frac{(v_k - v_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2}}{h_k} \end{aligned} \quad (2)$$

$$P_k = \sum_{i=1}^k g \rho_i h_i - 0.5 g \rho_k h_k \quad (3)$$

연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u_1(h_1 + \zeta) + \frac{\partial}{\partial y} v_1(h_1 + \zeta) - w_{3/2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} u_k h_k + \frac{\partial}{\partial y} v_k h_k + w_{k-1/2} - w_{k+1/2} = 0 \quad (5)$$

2.3 경계조건

모형의 계산영역은 기존 연구자의 계산영역에 준해서 설정하였으며(김현덕 등, 2001) 이는 만내의 수심분포를 고려하였고 주관심 대상영역이 모델경계로부터 계산상 발생할 수 있는 오차를 충분히 흡수할 수 있는 거리로 설정하였다. 계산 수심조건은 해도 기준수심에 포항항 평균해면을 고려하였으며(Fig. 3), 충분할은 총 7개의 층(2m, 2m, 2m, 4m, 5m, 그 외 수심)으로 분할하였다. 격자망은 126×148(=18,648격자)로 구성하였으며, 계산간격시간은 5초로서 CFL 안정조건과 전체 계산시간을 고려하여 최적화하였다(Fig. 4).

2.3.1 자유수면경계조건

유동장의 경계조건에 있어서는 육역과 해역과의 연직경계면에는 non-slip 조건을 적용하고, 자유수면에서 풍압력은 다음식을 적용하였다.

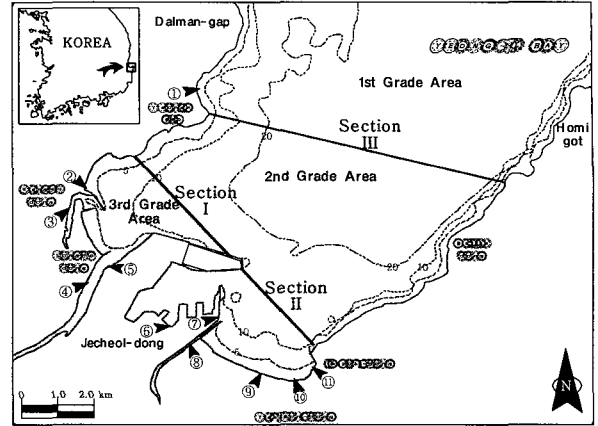


Fig. 3 Bottom topography and grades of water quality and river-inflow points of Yeong-il Bay

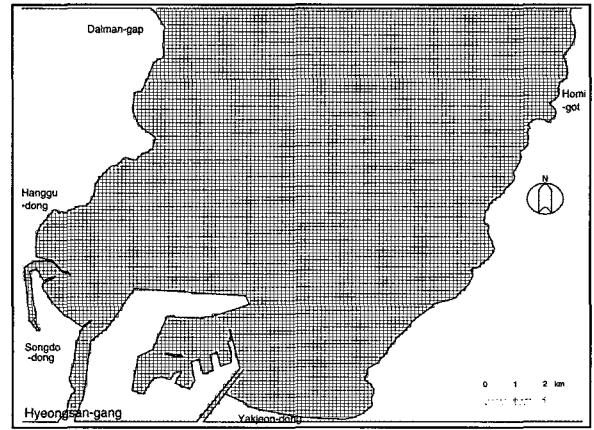


Fig. 4 Grid system for 3D numerical calculation

$$(\tau_{0x}, \tau_{0y}) = \left(\frac{\rho_a \gamma_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_1 (h_1 + \zeta)}, \frac{\rho_a \gamma_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_1 (h_1 + \zeta)} \right) \quad (8)$$

여기서, τ_{0x} 와 τ_{0y} 는 자유수면에서의 바람에 의한 응력 (Nm^{-2}), h_1 는 1층의 층두께(m), W_x , W_y 는 x, y 방향의 풍속 (ms^{-1}), ρ_a 는 공기밀도 (kg/m^3), γ_a^2 는 해면마찰계수 (=0.001)이다.

또한 자유수면에서의 순열 플럭스는 대기-자유수면간의 열교환에 의한 단파방사, 장파방사, 증발에 의한 잠열, 열전달에 의한 현열수송에 의한 해면을 통한 열수지를 고려하여 식 (9)를 사용하였다. 자유수면의 염분플럭스는 강우와 증발에 의한 담수의 출입을 고려한 식 (10)을 고려하였다.

$$T_H = -\frac{1}{\rho_w} c_p (q_e + q_c + q_r) + R_{in} T_{in} \quad (9)$$

$$C_H = S(0)(E_r - P_r) / \rho_w \quad (10)$$

여기서, T_H 와 C_H 는 자유수면에서의 순열 플럭스와 염분 플럭스를 나타낸다. 또한 q_e 는 해면에서의 증발에 의한 잠열

($Jm^{-2}s^{-1}$), q_o 는 해면에서의 열전달에 의한 현열 ($Jm^{-2}s^{-1}$), q_r 는 해면에서의 장파방사 전달량($Jm^{-2}s^{-1}$), R_{in} 은 육수·강수의 유입에 대한 해면상승율(ms^{-1}), T_{in} 는 유입수온(K), $S(0)$ 는 해면에서의 염분, $E_r - P_r$ 는 증발·강우에 의한 해면에서의 순담수량 플럭스이다.

2.3.2 해저경계조건

해저에서는 수온과 염분의 연직구배는 zero이고, 경계를 통한 열과 염분의 이동은 없는 것으로 가정하였다. 또한 해저면에서 마찰응력은 다음식과 같이 설정하였다.

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \left(\frac{\gamma_b^2 u_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{h_k}, \frac{\gamma_b^2 v_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{h_k} \right) \quad (11)$$

여기서, τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해저면에서 마찰응력(Nm^{-2}), γ_b^2 는 해저마찰계수($= g/C^2$, $C = h^{1/6}/0.026$)이다.

2.3.3 외해 조위경계조건

외해의 개경계에서의 조위 변동에 있어서는 다음식의 강제 수위를 고려하여 실시간 해수유동변동을 고려하였다.

$$\zeta(t) = \zeta_0 \cos(\omega t - k) \quad (12)$$

여기서, $\zeta(t)$ 는 경계격자의 조위, ω 는 각속도, t 는 시간, ζ_0 와 k 는 각각 경계격자의 조석진동과 위상각이다. 또한 조석 조화상수에 대해서는 관측치의 주요 4대분조인 M_2, S_2, O_1 및 K_1 분조(POSCO, 1995) 등 총 12개 분조를 고려하였다(Table 1).

Table 1 Tidal harmonic constants in Yeong-II Bay

Division	Dalman-Gap		Homi-Got		Po-hang	
	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$	H(cm)	$\kappa(^{\circ})$
M2	3.3	108.6	3.3	111.0	3.2	117.9
S2	0.7	213.1	0.8	206.0	0.7	155.3
K1	4.1	0.8	4.2	327.1	4.3	358.7
O1	4.4	325.5	4.5	360.0	4.6	327.1
SA	10.5	142.2	10.5	142.3	-	-
K2	0.6	173.2	0.6	173.5	-	-
N2	1.7	89.0	1.7	89.3	-	-
P1	1.2	353.0	1.2	353.2	-	-
Q1	1.0	301.6	1.0	301.9	-	-
M4	0.1	127.7	0.1	127.9	-	-
MS4	0.1	184.2	0.1	184.5	-	-
SSA	3.1	275.1	3.1	275.5	-	-
MSF	1.4	41.5	1.4	41.9	-	-
MF	1.6	235.7	1.6	235.9	-	-

※ POSCO(1995) for M_2, S_2, K_1, O_1

Fig. 5에서 조석표(tide tables)값은 국립해양조사원(2001) 포항기준검조소에서 관측한 조석자료를 바탕으로 64개 조화상수를 산출·합성하여 나타낸 영일만 해역의 조시 및 조위 예측값이다. 본 연구에서 12개 중요 분조만을 고려한 조위 예측치

와 64개분조를 고려한 조위예측치 사이에는 평균 5%의 차이가 나타나지만 전체적인 경향에서 미미한 오차로 생각되어진다.

2.3.4 외해 수온·염분경계조건

외해 개방경계에서의 수온과 염분의 경계조건(Fig. 6과 Fig. 7)은 국립수산과학원(2001)의 해양환경조사자료 및 기상청 포항기상대(2001)의 수온 관측자료를 바탕으로 다음 식과 같은 정현함수 관계식으로 표현하여 식(13)~식(16)을 적용하였다.

$$T_S = 12.45 - 3.80 \cos(1.5\omega(d-285)) \quad ; \text{ if } d \leq 130 \text{ else, } T_S = 18.40 + 7.05 \cos(1.25\omega(d-225)) \quad (13)$$

$$T_B = 9.00 + 2.65 \cos(1.7\omega(d-252)) \quad ; \text{ if } d \leq 103 \text{ else, } T_B = 11.50 + 6.05 \cos(1.2\omega(d-302)) \quad (14)$$

$$Cl_S = 34.27 + 0.16 \sin(1.42\omega(d-232)) \quad ; \text{ if } d \leq 95 \text{ else, } Cl_S = 33.335 + 0.98 \sin(1.2\omega(d-310)) \quad (15)$$

$$Cl_B = 34.035 + 0.41 \cos(1.0\omega(d-85)) \quad ; \text{ if } d \leq 80 \text{ else, } Cl_B = 34.095 + 0.35 \cos(1.05\omega(d-85)) \quad (16)$$

여기서, T 와 Cl 은 각각 수온과 염분농도이며, 첨자 S와 B는 각각 표층과 저층을 나타낸다. d 는 계산과정일수이고, 최초 계산일은 3월 1일이다. 또한 1층과 3층사이의 수온과 염분은 선형 보간하였다. ω 는 $2\pi/365$ 의 값을 가진다.

2.3.5 대기기상조건

실험에서의 대기기상조건은 Fig. 8과 같이 2001년도의 기온, 상대습도, 일사량, 강우량, 평균풍속, 운량 등을 입력조건으로 설정하였다. 사용되어진 대기기상조건은 입력조건은 포항기상대(기상청, 2001)에서 관측되어진 일평균치를 적용하였다.

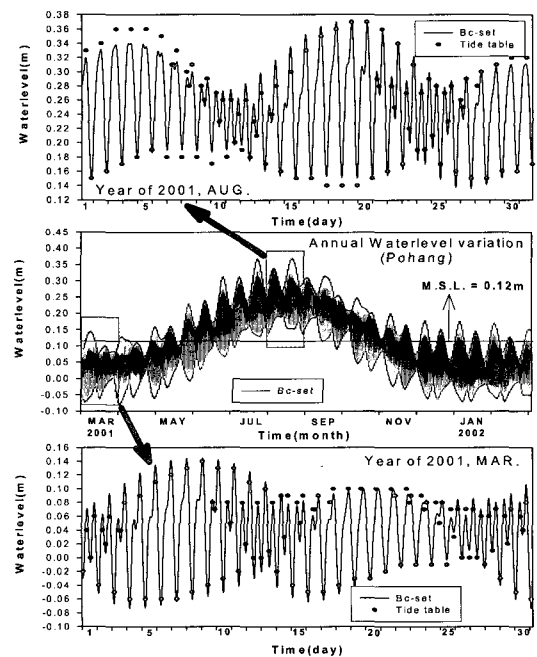


Fig. 5 Tidal water-level boundary condition and verification results

2.3.6 하천유량 및 오염부하량

모형의 입력조건인 하천유량은 포항지역의 일별강우량과 유역면적을 바탕으로 강우유출모형을 이용해 산정된 윤한삼 등 (2003)의 일별하천유량을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 해수유동장 수치모의

형산강을 통한 담수유입과 영일만내로의 동해 고유수 유입 시 하구밀도류 및 바람장의 특성에 따른 수괴의 거동특성을 예측하기 위해 3차원 실시간 해수유동 모형을 구축하고 수치 실험을 수행하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 실시간 계산기간중 대조기인 2001년 3월 8일의 창조류시와 낙조류시의 유속분포를 나타내고 있다. 창조류시인 Fig. 9에서 이종섭 등(1995)의 연구결과와 유사하게 표층의 경우 영일만 북쪽 달만갑 전면 해역으로부터 해수가 유입하여 호미곶 전면 해역을 따라 외해로 유출되는 경향으로, 반일주조보다는 일주조성분이 우세한 경향을 보였다.

그러나 포항신항 전면해역에서 항외로 유출되는 표층 해수 유동구조와는 상반되게 저층의 경우 외해로부터 만내로 유입되는 해수유동 패턴을 나타내었다. 또한 층별 유속분포를 살펴보면 표층의 유속 크기는 20cm/sec미만이고, 저층의 경우 4~10cm/sec의 분포를 나타내었다.

Fig. 10은 낙조류시의 해수유동계산결과로 표층의 경우 외해로부터의 유입의 경우보다 만내에서 외해로 유출하는 경향이 뚜렷하며 저층의 경우 호미곶 방향으로부터 유입하여 만내 포항신항 전면해역까지 도달하는 경향을 나타내었다.

3.2 밀도류와 바람장 영향

담수유입에 따른 하구밀도류와 바람장에 의한 취송류 발생시 영일만내 해수유동장에 미치는 영향을 살펴보기 위해 하천유입과 바람장의 유무에 따른 해수유동 수치실험을 실시하였다.

각 실험에 따른 결과는 Fig. 1에 나타내어진 3개의 단면에 대해 24시간의 net-flux water를 계산함으로써 비교하였다. 단면의 설정은 만내 수질등급기준과 동일하다(Fig. 3).

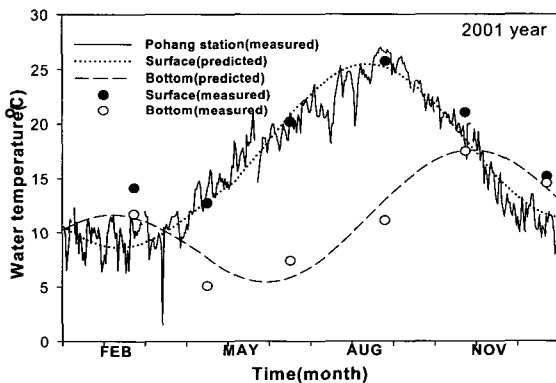


Fig. 6 Open boundary conditions of water temperature and numerical results compared with measured data

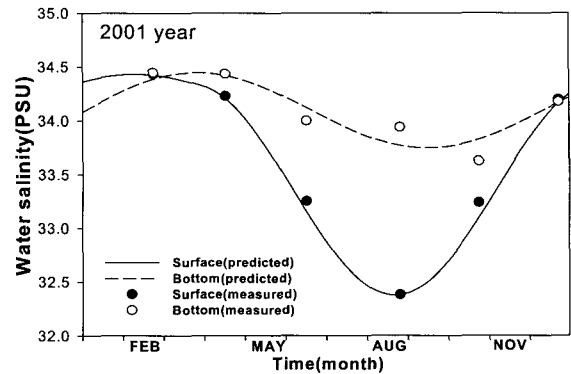


Fig. 7 Open boundary conditions of water salinity and numerical results compared with measured data

각각의 수치실험결과는 Fig. 11~Fig. 13에 도시한 바와 같다. Fig. 11은 형산강 하구와 포항구항을 포함하는 해역을 포함하는 단면 1에서의 결과로, 모든 실험에서 표층에서 외해로의 유출, 중·저층에서 만내로의 유입이 나타나는 것을 알 수 있다. 단면 1에서는 중층에서 만내측 방향으로 약 $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$, 표층에서 만외측 방향으로 약 $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을 나타내었으며, 취송류 및 밀도류에 의한 영향이 부분적으로 발생하며 취송류보다는 밀도류에 의한 영향이 다소 큰 것으로 판단되며, 차후 이에 대한 더욱 면밀한 검토가 요구된다.

또한 Fig. 12는 냉천과 포항신항, 약전동의 도수해수욕장을 포함하는 해역(단면 2)으로 Fig. 11에서와 동일하게 표층 외해 유출, 중·저층 만내 유입패턴을 나타내었다. 단면 2에서는 중층에서 만내측 방향으로 약 $1.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$, 표층에서 만외측 방향으로 약 $1.1 \sim 1.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을 나타내었으며, 대체로 담수하천유입에 따른 밀도류가 발생할 경우가 표층에서의 외해유출 강도가 더욱 커지는 경향을 나타내었다.

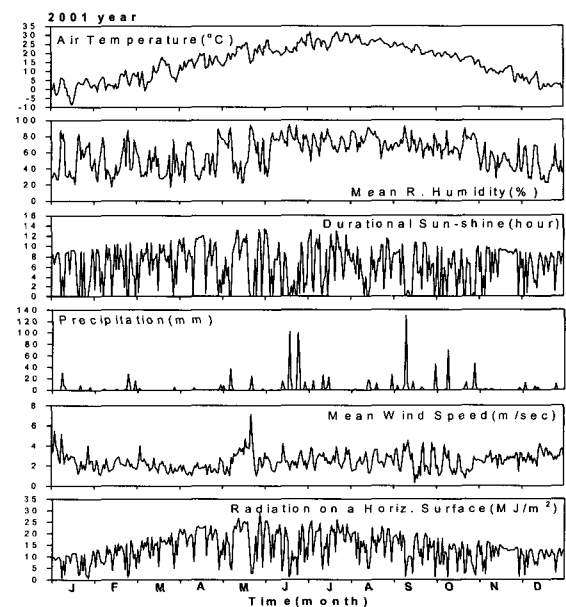


Fig. 8 Weathering boundary conditions(year2001)

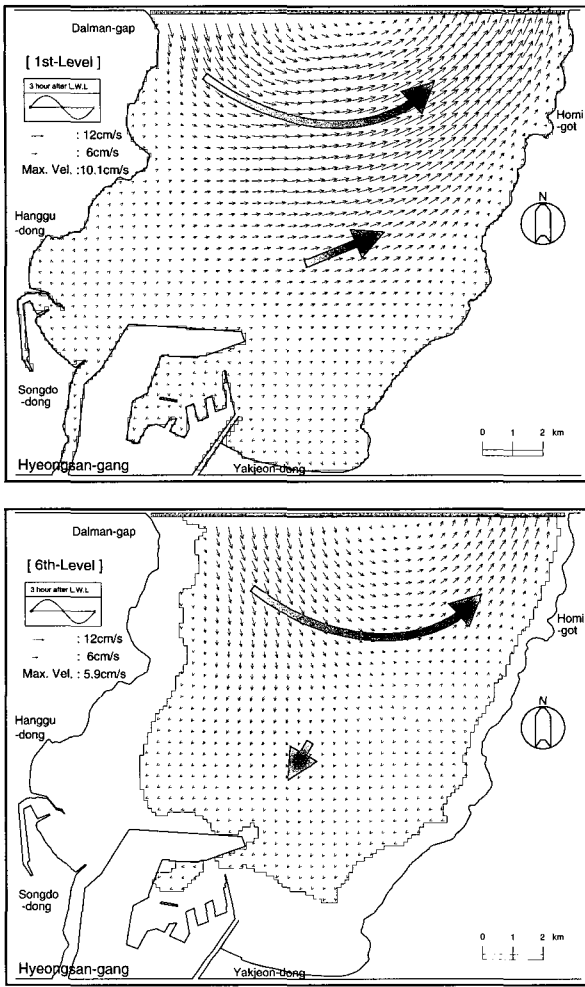


Fig. 9 Computed flood tidal current vector diagrams at the depths of 1m(upper), 16.5m(lower), (spring tidal period, Mar. 8, 2001)

그러나 Fig. 13과 같이 외해와 인접한 단면 3의 경우, 표층유출, 중·저층 유입의 특성을 나타내었으나 취송류나 하구밀도류에 의한 영향보다는 조석류에 의한 영향이 지배적인 것으로 생각된다. 단면 3에서는 중층에서 만내측 방향으로 약 $90.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$, 표층에서 만외측 방향으로 약 $15.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을 나타내었는데, 이는 표층에서의 유출보다 중층을 통한 만외측으로부터 만내측으로의 유입이 약 6배 강하게 나타났다.

이상의 결과를 통해 영일만내 육상오염부하량은 표층을 통해 외해로 유출되지만 중·저층을 통해 다시 만내로 유입되는 과정을 가지는 것으로 생각된다. 따라서 포항신항을 중심으로 좌우측의 해역에서 수질오염이 심한 원인이 육상으로부터의 과도한 오염부하량의 유입뿐만 아니라 외해로의 유출을 제어하는 만내의 물리환경적 요인도 작용할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 형산강을 통한 담수유입과 영일만의 동해 고유수

유입시 하구밀도류 및 취송류의 특성에 따른 만내 수괴의 거동 특성을 예측하기 위해 3차원 실시간 해수유동모델을 구축하였다. 이를 이용하여 2001년 3월의 실시간 조석류, 담수유입, 대기 기상조건 등을 입력조건으로 수치실험하였으며, 하구밀도류와 바람장에 따른 취송류가 만내 해수유동패턴에 미치는 영향을 살펴보기위해 각각의 영향인자별로 분석하였으며 영일만내 수질과의 상호관련성을 고찰하였다.

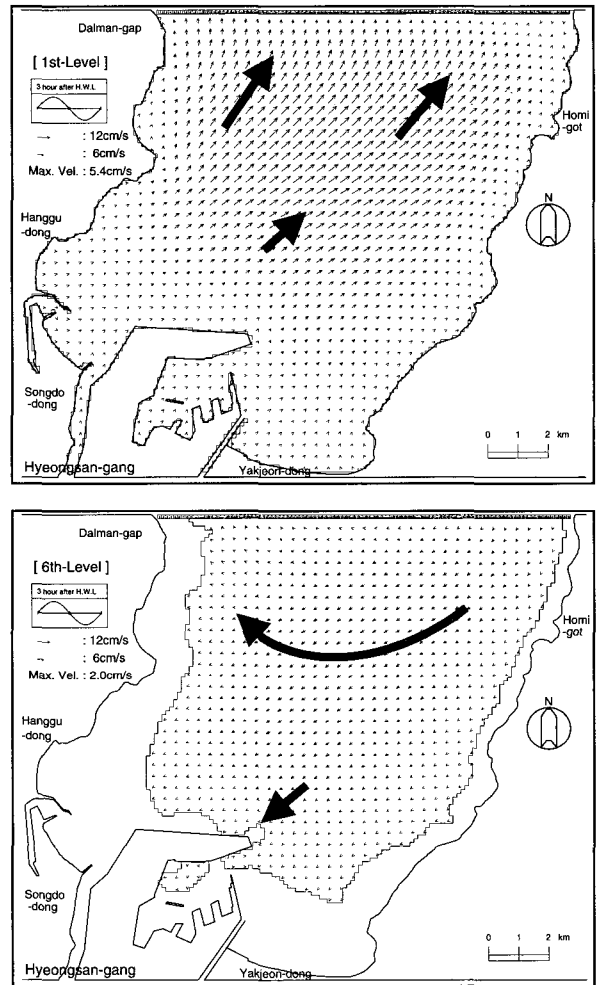


Fig. 10 Computed ebb tidal current vector diagrams at the depths of 1m(upper), 16.5m(lower), (spring tidal period, Mar. 8, 2001)

이상과 같이 영일만의 단면별 net-flux water 값을 계산한 결과, 형산강 하구에서는 중층에서 만내측 방향으로 약 $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$, 표층에서 만외측 방향으로 약 $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을, 냉천과 포항신항, 약전동의 도수해수욕장을 포함하는 해역에서는 중층에서 만내측 방향으로 약 $1.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$, 표층에서 만외측 방향으로 약 $1.1 \sim 1.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을, 영일만 전체 해역에 대한 계산결과에서는 중층에서 만내측 방향으로 약 $90.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$, 표층에서 만외측 방향으로 약 $15.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을 나타내었다.

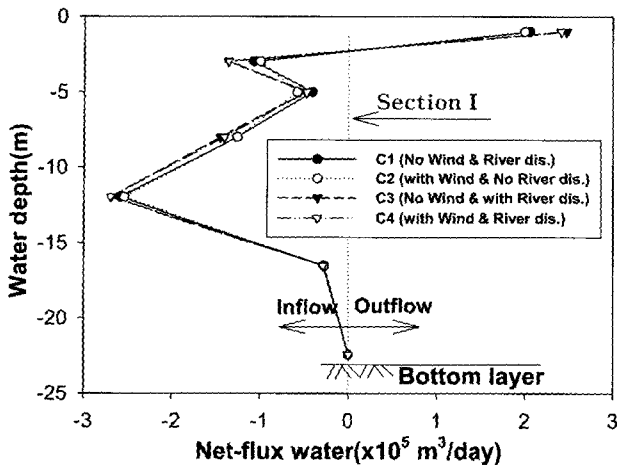


Fig. 11 Computed daily net-flux water for four experimental cases at the section I

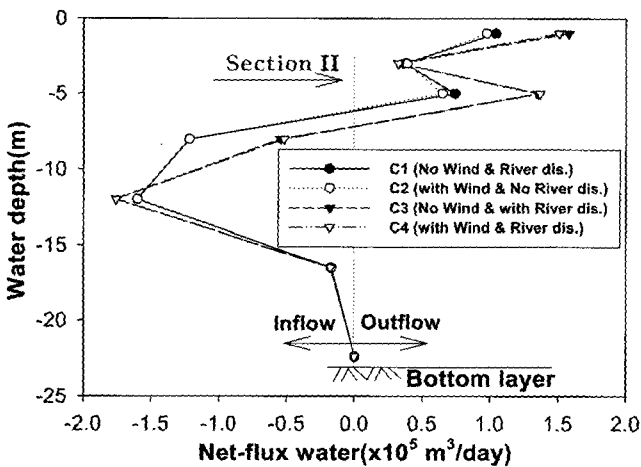


Fig. 12 Computed daily net-flux water for four experimental cases at the section II

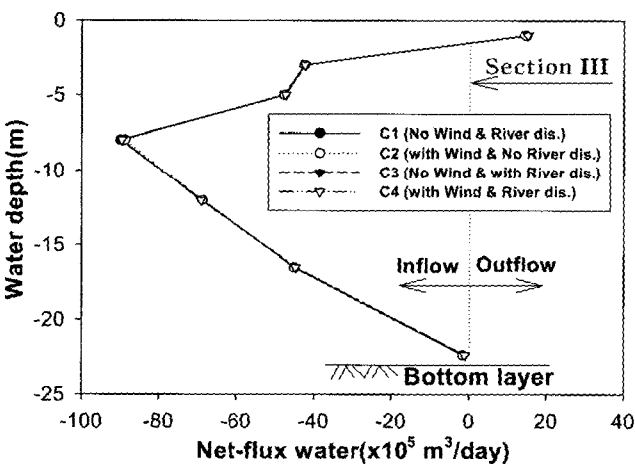


Fig. 13 Computed daily net-flux water for four experimental cases at the section III

영일만내 오염물질은 표층 외해 유출, 중·저층 만내 유입의 이층 구조로 이루어져 있음을 알 수 있으며, 결과적으로 만내로 유입된 오염물질은 외해 유출뿐만 아니라, 만내 침강과 아울러 저층의 고밀도 염분유량에 의해 육지방향으로 운반되어 영양염집적해역 (nutrient trap)을 형성시킬 가능성이 클 것으로 판단된다.

한편, 본 연구의 계산결과를 통해 명확히 만내 해수유동거동 특성, 하구순환류의 발생 메카니즘 및 오염물질의 확산기구를 규명하기에는 미흡한 점이 많다. 계산시간이 15일로서 단기간에 한정되어 있으므로, 장기적인 변화를 위한 기초 자료로서 활용하기 위해서는 차후 연간변동계산 등의 과정이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

강양순, 김귀영, 심정민, 성기탁, 박진일, 공재열 (2002). "영일만 수질의 시공간적 변동", 한국수산학회지, 제35권, 제4호, pp 431-437.
 국립수산물과학원 (2001). 해양조사연보.
 국립해양조사원(NORI) (1971). 영일만 및 부근일대 해양관측결과 보고서, pp 34-49.
 국립해양조사원 (2001). 조석표.
 기상청 (2001). 기상연보.
 김종규 (2001). "영일만의 조석잔차류 거동특성", 한국환경공학회지, 제4권, 제1호, pp 14-23.
 김현덕, 김종인, 류청로 (2001). "영일만내 유동과 수질특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 28-37.
 윤한삼, 이인철, 류청로 (2003). "영일만 유입오염부하량과 수질의 시·공간적 변동특성(II) -유입오염부하량과 수질의 상호거동", 한국해양공학회지, 제17권, 제5호, pp 32-38.
 윤한삼 (2004). 육역-해역혼합모델을 이용한 연안해양환경 특성 평가 및 해역관리에 관한 연구, 부경대학교 박사논문.
 이종섭, 김차겸, 김종화, 임기봉 (1995). "영일만의 해수유동 구조 및 확산특성", 한국해양학회지, 제30권, 제5호, pp 467-479.
 조홍연 (1999). "연안해역에서의 혼합과정", 한국수자원학회지, 제32권, 제1호, pp 55-60.
 최성욱 (1999). "밀도류 이론", 한국수자원학회지, 제32권, 제1호, pp 41-49.
 포항종합제철주식회사(POSCO) (1995). 포항제철주변 해양환경조사 보고서, pp 1-19.
 Lee, I.C. and Hoshika, A. (2000a). "Seasonal Variations in Pollutant Loads and Water Quality in Hiroshima Bay", J. of Japan Society on Water Environment, Vol 23, No 6, pp 367-373 (in Japanese).
 Lee, I.C. and Hoshika, A. (2000b). "Numerical prediction of tidal current, water temperature and salinity in Hiroshima bay by real-time simulation", Reports of Chugoku National Industrial Research Institute, No 54, pp 21-31 (in Japanese).

2004년 4월 2일 원고 접수
 2004년 10월 4일 최종 수정본 채택