

반폐쇄하구에서의 유동 및 성층구조에 관한 시뮬레이션

이우철* · 이종우** · 박동진***

* 한국해양대학교 대학원, ** 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수, *** 일본 (주) 건설기술연구소

Numerical Simulation in relation with Coastal Current and Stratification of Water at the Semi-enclosed Estuary

Woo-Chul Lee* · Joong-Woo Lee** · Dong-Jin Park***

*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***CTI Engineering Co., Ltd., Japan

요 약 : 잔차류는 연안역에서 큰 스케일에서의 물질수송에 대한 관점에서 보면 조류보다 더 중요한 역할을 한다. 이러한 잔차류의 주된 성분은 조석 잔차류이며, 취송류, 밀도류 등도 이 흐름을 변동시키는 중요한 인자들이다. 이러한 연안역의 흐름의 특성을 규명하기 위해서는 3차원 유동모델의 적용이 필수적이다. 본 연구는 하천으로부터 담수유입에 의한 연안수역의 성층화 구조를 다루는데 초점을 두었으며, 이를 위해 3차원 밀도류모델을 적용하여 울산만의 유동을 재현하고, 담수유입에 의한 성층화 구조를 규명하였다. 그 결과 울산만과 같이 담수유입이 존재하는 반폐쇄 하구에서는 표층에서는 만외로 유출하고, 저층에서는 만내로 유입하는 흐름이 발생하였다. 또한 만내방향으로의 바람이 존재하는 경우에는 표층에서는 만내로 유입하는 흐름이, 저층에서는 이에 대한 보상류로 만외로 유출하는 흐름이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 해수유동결과는 해양복합 조성용 위한 인공어초투하, 연안표사 제거를 위한 잠제건설, 해저산맥 조성 등으로 인한 연직방향으로의 용승현상에 대한 규명이나 심층수 활용을 위한 기초연구에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 반폐쇄하구, 조석잔차류, 취송류, 밀도류, 3차원 유동모델, 성층화구조

Abstract : Residual current plays more important role than the tidal current for long-term material transport in coastal areas. The main component of residual current is tide-induced residual current. Otherwise, wind-driven current and buoyancy-driven current are important components which change the residual current. To clarify the characteristic of coastal current, application of a three-dimensional model is necessary. This study focuses on clarifying the stratified systems of coastal water affected by freshwater runoff from a river and analyzes the structure of current at Ulsan bay by applying a three-dimensional buoyancy-driven current model. According to the result of "Ulsan bay" study, it shows that the surface layer in semi-enclosed estuaries, which affected by freshwater runoff, has flows going out, and the bottom layer has flows coming in. Besides when the wind blows toward inside of the bay, the surface layer has flows coming in and the bottom layer has flows going out as compensation flows for the surface circulation. The results of simulation could be applicable to examine vertical upwelling, which might be caused by construction of artificial fishing reef to build aqua farm, submerged breakwater to control coastal sediment, and the formulation of oceanic ridge, or a basic study on application to the usage of deep water.

Key words : Semi-enclosed estuaries, Tide-induced residual current, Wind-driven current, Buoyancy-driven current, 3-dimensional current model, Stratified systems

1. 서 론

연안해역에서 가장 탁월한 유동은 조류이다. 그러나 실제로 해수교환 및 물질수송에 기여하는 것은 잔차류이다. 잔차류에는 조류운동의 비선형성에 의해 생기는 조석잔차류(tide-induced residual current)가 주된 인자이며, 바람에 의해 발생하는 취송류(wind driven current), 수온과 염분의 차에 의해 발생하는 밀도류(buoyancy-driven current)등이 이 흐름을 변동시키는 중요한 인자들이다. 이 중에 밀도류는 여름철

해저에 형성되는 빈산소 수괴와 부영양화로 인한 적조의 발생 등과 같은 수질오염현상에 크게 관여하고 있다.

이와 같은 연안해역의 복잡한 유동장을 예측하고, 물리환경의 변화가 생태계에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 3차원 유동모델의 도입이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 밀도류를 비롯한 연안역의 3차원 유동구조를 재현 가능한 모델을 구축하고 그 모델을 현장에 적용하여 그 재현성을 검토하였다.

* 대표저자 : 이우철(중신회원), ddkk123h@hotmail.com 051)203 7113
** 중신회원, jwlee@hanara.hhu.ac.kr 051)410-4461
*** 중신회원 dpark890120@ybb.ne.jp

2. 대상영역

본 연구의 대상영역은 최근 적조로 인해 봄살을 앓고 있는 울산만으로 하였다. 울산만은 동해안 남부의 방어진의 서쪽에 위치한 폭 900~2,000m, 길이 약 6.6km, 수면적 6.3km²의 만으로, 입구의 수심이 약 12m정도이고, 좁고 긴 직사각형 구조를 하고 있다. 특히 만 북쪽에는 태화강이 유입하고 있어 염분농도차에 의한 밀도성층의 형성이 예측되므로, 본 연구의 적절한 대상영역으로 판단된다(Fig. 1, Fig. 2).

계산영역은 울산만 중 태화강 유역입구에서부터 장생포를 포함하는 좌측경계와 화암추까지를 우측경계로 하는 직사각형 영역으로 하였다.

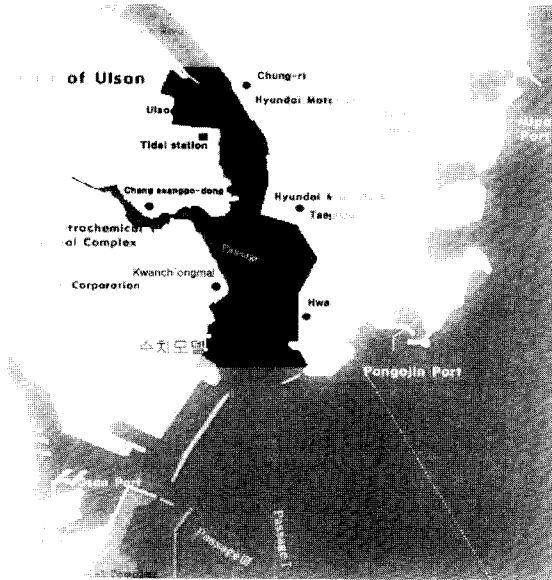


Fig. 1 Location map for numerical simulation

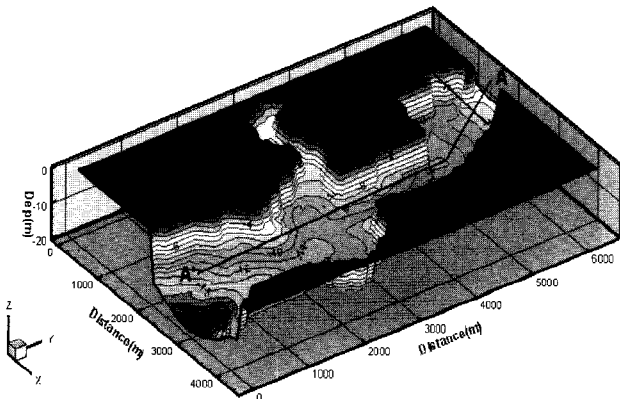


Fig. 2 Three dimensional contour map

3 모델의 구성

3.1 지배방정식

기초식은 질량, 운동량, 염분의 보존식으로 구성하였다.

좌표계는 수평방향에 x, y축, 연직상방향에 z축을 가지는 3차원 직교 좌표계를 이용하였다(Fig. 3).

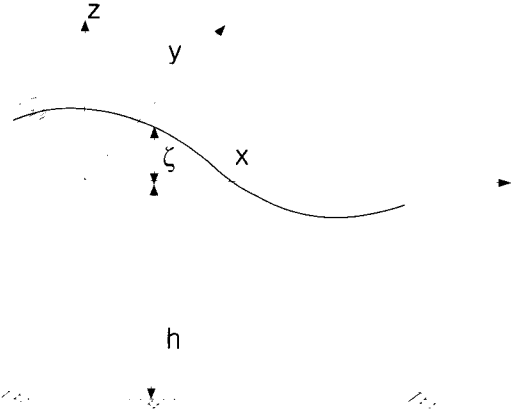


Fig. 3 Definition of coordinate system

아래와 같은 가정을 통하여 식 (1)~식 (6)에 나타낸 연속방정식, 운동방정식, 염분의 질량보존식을 얻었다.

- ① 물은 비압축성이다.
- ② Boussinesq의 근사를 도입한다. 즉, 밀도변화의 영향은 압력항에서만 고려된다.
- ③ 흐름의 연직방향가속도는 중력가속도에 비해 충분히 작다. 즉, 연직방향의 압력은 정수압에 의해 근사화된다.
- ④ 난류수송항에는 와동점성계수, 와동확산계수를 도입한다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(UU)}{\partial x} + \frac{\partial(UV)}{\partial y} \\ + \frac{\partial(UW)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{tx} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{ty} \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{tz} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + fV \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(VU)}{\partial x} + \frac{\partial(VV)}{\partial y} \\ + \frac{\partial(VW)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{tx} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{ty} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{tz} \frac{\partial V}{\partial z} \right) - fU \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(US)}{\partial x} + \frac{\partial(VS)}{\partial y} + \frac{\partial(WS)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho TC_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho UTC_p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VTC_p)}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(\rho WTC_p)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tx} \frac{\partial(\rho TC_p)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ty} \frac{\partial(\rho TC_p)}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tz} \frac{\partial(\rho TC_p)}{\partial z} \right) + \frac{dH(z)}{dz} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, U, V, W : 유속의 x, y, z 방향성분, P : 압력, f : 코리올리 계수, $\nu_{tx}, \nu_{ty}, \nu_{tz}$: x, y, z 방향의 와동점성계수, g : 중력가속도, S : 염분농도(ppt), T : 수온($^{\circ}\text{C}$), C_p : 정압비열, ρ : 밀도(kg/m^3), D_{tx}, D_{ty}, D_{tz} : x, y, z 방향의 와동확산계수, H : 수면을 통한 열교환량이다. 또한, 상태방정식은 염분과 수온만의 함수로 하였다.

수치시뮬레이션은 차분법을 이용하여, 운동방정식 가운데 수면압력항과 연직점성항 및 연속식 전체의 항에 음해법을 적용하였다. 또한, 차분법과 계산알고리즘의 기본적인 사고방식은 Backhaus(1985)를 따랐다.

3.2 난류확산

연직방향의 난류확산은 밀도구배와 흐름의 연직응력의 크기에 따라 크게 변하므로, 연직와동확산계수와 연직와동점성계수는 리차드슨수의 함수로 정의하였다.

$$Ri = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial z}{(\partial U / \partial z)^2} \quad (7)$$

$$\nu_{tz} = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| (1 + \alpha Ri)^{-\beta} \quad (8)$$

$$D_{tz} = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| [\exp(-4.5 Ri)]^2 \quad (9)$$

여기서, l 은 혼합거리이다. ν_{tz} 의 감쇠계수 α 에는 Ueda (1981)의 모델을, D_{tz} 의 평가에는 Van Rees(1975)의 모델을 적용한다. 또한, 수평방향의 와동점성계수는 연직방향과 동일한 값을 주었다. 수평방향의 와동확산계수는 국소적인 수평유속구배를 도입한 Smagorinsky et al.(1965)의 SGS계수를 적용하였다.

$$\begin{aligned} D_{tx} = D_{ty} = C_{dif} \nabla x \nabla y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, D_{tx}, D_{ty} 는 각각 x, y 방향의 수평확산계수, u, v 는 각각 x, y 방향의 수평유속, C_{dif} 는 무차원계수($=10$)이다.

3.3 경계조건

1) 개방경계조건

조석을 표현하기 위해서 시시각각 변화하는 수위값을 주어 수위의 구배에 의해 흐름을 발생시킨다. 개방경계에서의 유속구배는 없는 것으로 하였다. 통상 염분과 수온은 연직방향의 구배를 0으로 하는 경우가 많지만, 이렇게 하면 표현이 불가능하므로 실제의 관측데이터를 주는 것이 제일 좋은 방법이다.

2) 수표면 및 해저면에서의 전단응력조건

해면상의 전단응력은, 풍속·풍향의 관측데이터를 이용하여, 다음의 관계식에 의해 얻어진다.

$$\tau_{wx} = \rho C_f \sqrt{u_w^2 + v_w^2} u_w, \quad \tau_{wy} = \rho C_f \sqrt{u_w^2 + v_w^2} v_w \quad (11)$$

여기서, τ_{wx}, τ_{wy} 는 수표면의 전단응력, u_w, v_w 는 풍속의 x, y 방향성분이다. 또한, C_f 는 수표면에서의 마찰계수로서 풍속의 절대치의 함수로서 얻어진다(Shen et al., 1994).

해저 마찰응력은 다음의 함수에 의해 평가하였다.

$$\tau_{bx} = \rho \gamma_b^2 \sqrt{u_b^2 + v_b^2} u_b, \quad \tau_{by} = \rho \gamma_b^2 \sqrt{u_b^2 + v_b^2} v_b \quad (12)$$

여기서, u_b, v_b 는 각각 저면에 접하는 검사체적(Control Volume)상에 정의된 유속의 x, y 방향성분이다. γ_b^2 은 해저마찰계수로 $\gamma_b^2=0.0026$ 으로 주었다.

3) 그 외의 경계조건

벽면에서는 slip condition을 채용하였으며, 벽면과 해저에서의 염분·수온구배를 식 (13)과 같이 두어, 벽면 및 해저를 통한 수온과 염분 플럭스는 없는 것으로 하였다. 하천유입지점에서는 염분농도가 0인 담수가 유입하는 것으로 하고, 수온은 관측치가 없을 경우 기온차를 이용하여 추정할 수 있도록 하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

4. 수치실험 및 분석

4.1 모델의 검정

본 연구에서는 수치모델을 현장에 적용하기 전에 해석해가 존재하는 장방형수로에 적용하여 Brebbia & Patridge (1976)의 연구에서 얻어진 해석해와 계산해를 비교·검정하였다.

장방형 수로는 4,000m×1,600m의 직사각형 영역으로 설정하였으며, 수심은 일정하다. 또한 가로, 세로는 200m의 간격으로 총 계산격자수를 160개로 구성하였으며, 좌측부에는 개방경계조건을 주었고 그 외의 고정경계면에는 slip condition을 주었다.

비교를 위한 실험에서의 조건은 진폭 0.5m, 3,600sec, 수심 =20m, $\Delta t=5.625\text{sec}$ 로 하였다. 1차원 수로에서, 바닥전단응력을 무시하였을 경우 Brebbia & Patridge(1976)에 의한 1차원 모델의 해석해는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\alpha}{\cos\left(\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\right)} \cos\left[\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l}-1\right)\right] \sin \omega t \quad (14)$$

$$u = \frac{\alpha\sqrt{gh}}{h \cos\left(\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\right)} \sin\left[\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l}-1\right)\right] \cos \omega t \quad (15)$$

여기서, x : 수로입구로부터의 거리(m), α : 진폭, l : 장방향 수로길이(m), h : 수로 수심(m), T : 주기(sec), ω : 각속도($2\pi/T$)이다.

Fig. 4는 식 (14)와 식 (15)에 $x = 2,000\text{m}$, $l = 4,000\text{m}$, $\alpha = 0.5\text{m}$, $h = 20\text{m}$, $T = 3,600\text{sec}$, $\omega = 2\pi/T$ 를 적용한 결과와 장방향 수로에서의 계산결과를 비교한 그래프이다.

Brebbia의 해석해와 장방향 수로의 중앙에 위치한 격자점에서의 수위와 유속이 진폭 및 주기가 거의 유사한 것으로 나타났다.

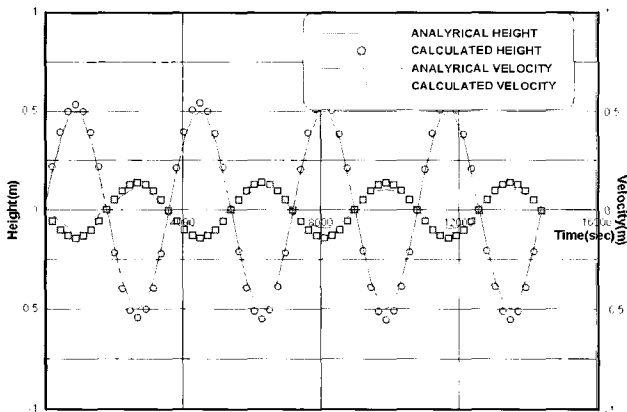


Fig. 4 Comparison of calculated results and analytical solution

4.2 실험 조건

본 연구에서는 현장의 재현성을 알아보기 위해 울산만에서 탁월한 반일주조인 M2분조만을 고려하여, 만입구 개방경계에서 선형조석파를 주어 주기적인 왕복성 유동장을 표현하였다. 여기에, 담수유입 및 바람을 주어 실제 물질수송에 기여하는 잔차류의 대표적인 예인 밀도류, 취송류, 조석잔차류의 유동구조와 밀도성층의 구조에 대하여 수치실험을 행하였다.

먼저 계산영역에 대한 수평방향으로는 가로, 세로 100m의 격자로 총 계산 격자수는 985개로 선정하였으며, 연직방향의

격자수는 부등간격으로 총 5층으로 하였다. 또한 연직방향의 염분분포를 알아보기 위해, 태화강입구에서 만입구까지를 종단하는 A-A'구간과 태화강입구 부근을 횡단하는 B-B'구간을 설정하였다(Fig. 2).

수치실험은 M2분조의 조석에 의해 형성되는 주기적인 왕복성 유동장에 의뢰된 담수유입 및 바람을 고려하여 정상상태로 되는 시간을 확인하여, 정상상태에서의 유동 및 밀도구조를 평가하는 정상계산으로 수행하였다. 담수유입만을 고려한 경우의 정상상태에 이르는 시간을 확인한 결과 그 기간은 30주기였으므로, 모든 계산기간은 이것을 기준으로 하였다. 그 외의 기본적인 계산조건은 Table 1과 같다.

밀도류와 취송류, 조석잔차류의 유동구조를 확인하기 위하여, Table 2와 같이 4개의 Case로 나누어 수치실험을 행하였다. 첫 번째는 바람 및 담수유입을 고려하지 않은 경우 (Case 1)와 두 번째, 세 번째는 바람(Case 2) 및 담수유입(Case 3)을 하나씩 고려한 경우, 그리고 마지막으로 네 번째는 이 두 가지를 함께 고려한 경우(Case 4)이다. 해역의 경우는 담수역(댐, 호수)과는 달리 염분에 의한 밀도변화가 수온변화에 의한 밀도변화보다 크므로, 본 연구에서는 수온변화는 고려하지 않았다.

현장의 재현성검토를 위한 실험의 검증은 관측데이터가 적은 관계로 정량적인 비교가 어려워, 본 연구에서는 정상계산을 통하여 울산만의 정성적인 유동현상을 파악하는데 목적을 두고, 울산검조소에서 관측한 실제의 조위변동과 그 지점에서의 계산조위를 비교하는 것으로 하였다.

Table 1 Input conditions for numerical model

Items	Input condition
Δt	300sec
조석	M2분조(진폭 0.163m, 주기 44700sec)
유량(태화강)	0.12m ³ /sec
바람	SSE풍, 2m/sec
계산기간	30cycle

Table 2 Simulation conditions

	Wind	River inflow	Analysed
Case 1	X	X	Residual Tidal Current
Case 2	O	X	Wind driven Current
Case 3	X	O	Buoyancy driven Current
Case 4	O	O	Wind driven Current + Buoyancy driven Current

4.3 실험결과 및 분석

Fig. 5는 울산검조소의 조위와 그 지점의 조위를 비교한 그

래프이다. 울산항의 조석형태수는 0.26~0.30으로 만일주조가 우세한 혼합형이므로 본 연구에서는 M2분조만을 고려하였다. 시간 스텝에 따라 다소 차이는 있으나, 실제의 관측결과와 거의 유사한 주기의 형태를 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러므로 울산항의 대표적인 조석인 M2분조에 의한 주기적 현상의 재현에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

1) 조석잔차류 구조

바람 및 담수유입을 고려하지 않은 경우, 울산만의 지형조건이 형성하는 조석잔차류 구조의 검토가 가능하다. 먼저 Fig. 6의 (a), (b)에 Case 1의 창조, 낙조시의 유속벡터를 나타내었다. 유속벡터는 지형을 따라 창조시 북쪽으로 유입하고, 낙조시 남쪽으로 유출하는 경향을 띄고 있다. 그리고 표층과 저층의 유속벡터의 크기 및 방향은 큰 변화 없이 유출, 유입하는 것으로 나타났다. (c)에는 Case 1의 잔차류를 나타내었다. 비선형 조석을 고려할 경우, 잔차류의 정의가 어려운 점이 있지만, 본 연구에서는 정현파를 주고 있으므로, 30사이클째의 만조에서 다음 만조까지의 유속의 평균으로 잔차류를 쉽게 정의할 수 있으며, 그 결과 잔차류의 크기는 창조시의 유속에 비해 아주 작은 것으로 나타났다.

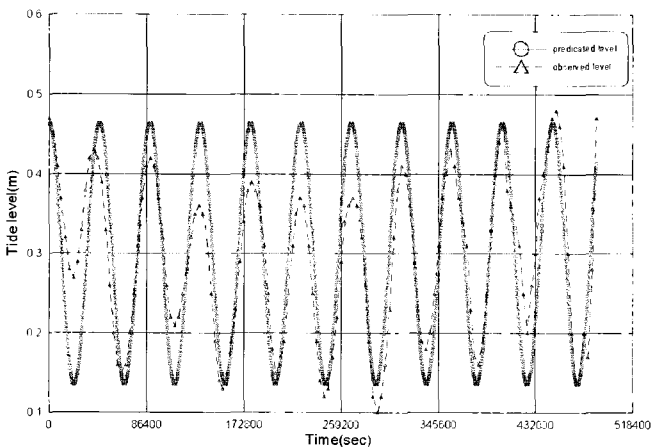


Fig. 5 Comparison between observed and calculated tides

2) 취송류 구조

Case 2는 SSE풍의 바람이 2m/sec로 불 때, 취송류가 형성

되는 유동장을 나타내었다.

먼저, 창조, 낙조시의 유속벡터는 Case 1과 비교하여 보면 약 3~4배 정도 크게 나타났으며, 유동장도 현저히 다른 경향을 띄는 것으로 나타났다. Fig. 7의 (a)에서는 창조시 표층은 바람에 의한 전단응력에 의해 바람이 불어가는 방향으로 끌려가며, 수심이 얕은 해안선 부근에서는 유속벡터가 커지는 현상을 볼 수 있다. Fig. 7의 (b)를 보면 낙조시에는 바람에 의해 끌려가는 방향과 낙조시 유속벡터의 방향이 서로 반대방향이므로, 표층에서는 와류를 형성하는 것으로 나타났으며, 저층에서는 유출하는 현상을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 (c)에서 잔차류는 표층에서는 유입, 저층에서는 유입에 대한 보상류로서 유출하는 경향을 띄는 것으로 나타났다.

3) 밀도류 구조

Case 3에서는 울산만 북쪽에 위치한 태화강으로부터 0.12m³/sec의 담수유입을 주었을 경우, 염분농도차에 의해 형성되는 밀도류의 형성구조를 나타내었다. 하천에서 유입하는 담수는 해수보다 염분농도가 낮으므로, 해수의 위를 타고 만입구를 향하여 흘러 나간다. Fig. 8의 (a)를 보면, 창조시의 유속벡터는 표층의 담수유입에 의한 흐름과 방향이 반대이므로 유속벡터의 크기가 감소하는 것으로 나타났으며, (b)의 낙조시에는 그 반대의 경향을 띄는 것으로 나타났다.

(c)의 표층과 저층에서의 잔차류를 보면 표층에서는 유출을, 저층에서는 유입하는 하구 연직순환류를 확인할 수 있었다.

4) 밀도류와 취송류를 동시에 고려한 경우

Case 2와 Case 3을 보면, 바람과 담수유입에 의해 발생하는 각각의 잔차류는 정반대의 경향을 띄는 것으로 나타났다. 물론 바람의 방향에 따라서 취송류의 형성패턴은 다르지만, 여기서는 SSE풍을 고려하고 있으므로 두 Case는 반대방향의 경향을 띄는 것으로 생각된다.

Fig. 9의 (a)에서 표층의 유속벡터를 보면, 창조시에는 조류+취송류의 외력이 표층유출의 외력보다 지배적으로 나타나 표층은 유입의 경향을 띄고 있으며, 특히 장생포항의 항내쪽에서는 유속이 커지는 것으로 나타났다. Fig. 9의 (b)에서 낙조시에는 조류+표층유출의 외력이 취송류보다 지배적으로 나타나 표층에서는 유출의 경향을 띄는 것으로 나타났다.

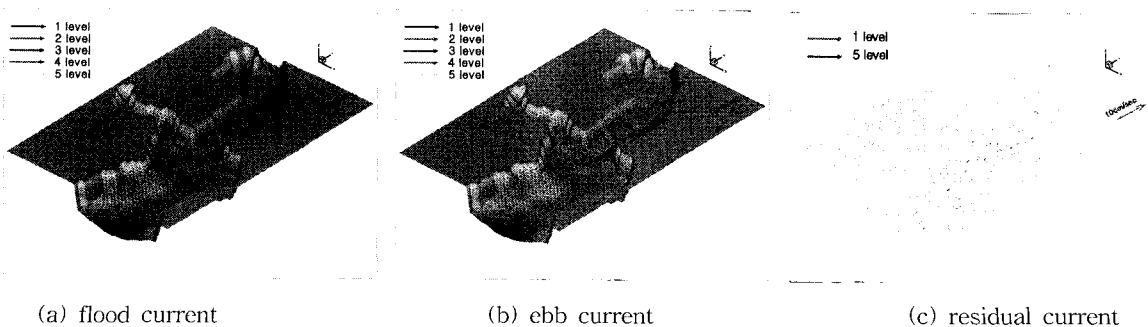


Fig. 6 Velocity distribution of Case 1

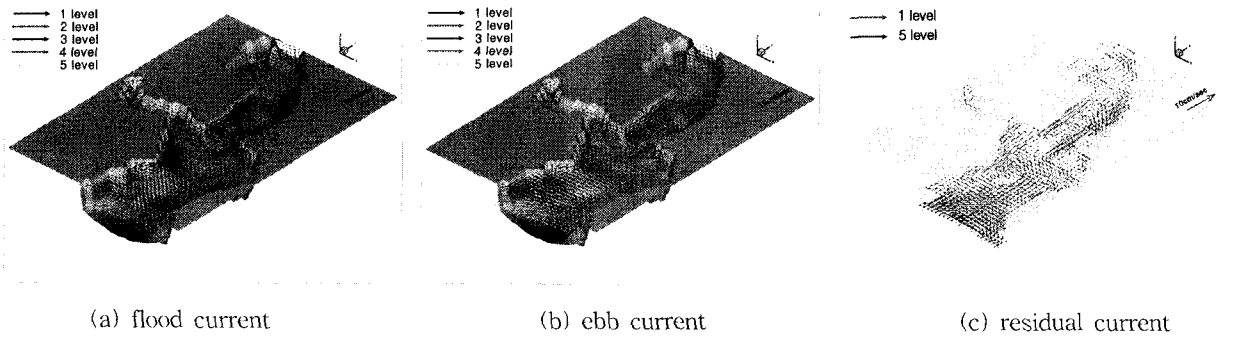


Fig. 7 Velocity distribution of Case 2

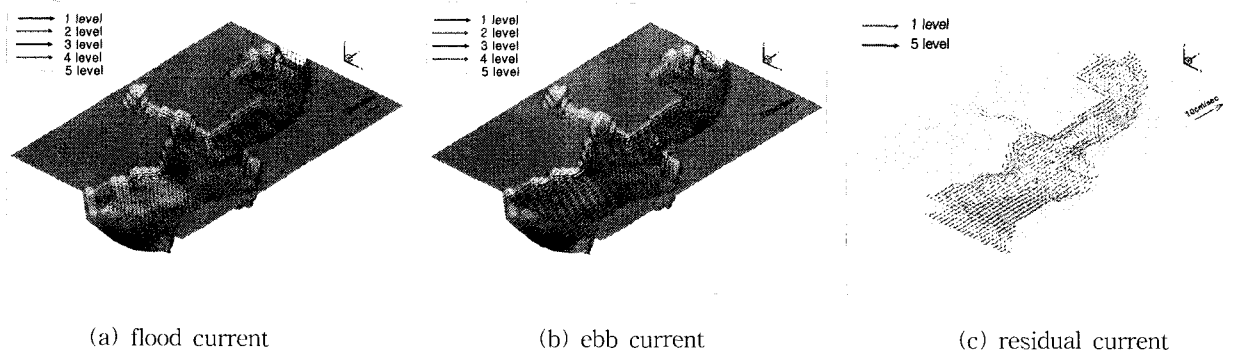


Fig. 8 Velocity distribution of Case 3

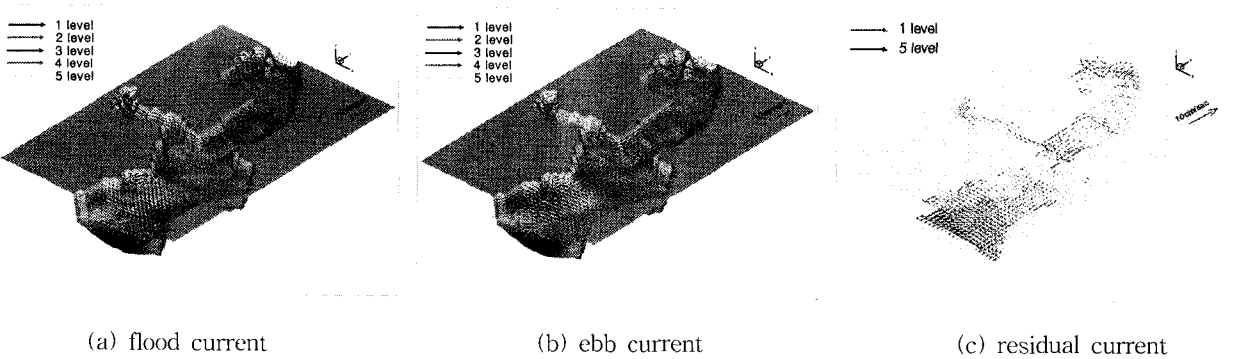


Fig. 9 Velocity distribution of Case 4

Fig. 9에서 (c)의 잔차류를 보면 표층, 저층 모두 만입구에서는 바람의 영향이 크며, 전반적인 잔차류의 경향으로는 밀도류의 표층 유출, 저층 유입의 하구 순환의 경향이 강한 것으로 나타났다. 하지만 동시에 담수유입량이 적어지고, 풍속이 증가하면 밀도류보다 취송류에 의한 잔차류장의 형성이 클 것으로 예상된다.

5) 울산만의 성층구조

조류의 주 흐름방향인 A-A' 구간(Fig. 2 참조)의 단면별 유속분포를 알아보기 위해, 수심간격을 1, 2, 2, 3, 3, 4, 5m로 총 7층으로 채구성하여 각 Case별로 10사이클 동안의 계산을 하였다. Fig. 10은 바람 및 담수유입을 함께 고려한 Case 4의 창

낙조시 유속분포로, 바람 및 담수유입의 영향으로 인해 복잡한 유동장을 형성하는 것으로 나타났다.

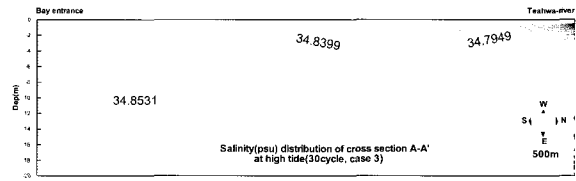
Fig. 11은 B-B' 구간에서 담수유입에 의한 밀도류 형성시의 고조시 연직방향의 염분분포를 나타내었다. 수심 6m부근에서는 해수 및 담수의 혼합이 발생하는 혼합층이 존재하는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 A-A' 구간의 고조시 염분분포를 나타내었다. (a)는 담수유입만을, (b)는 담수유입 및 바람을 함께 고려한 경우의 연직방향의 염분분포이다. (a)와 (b) 모두 태화강 입구에서 밀도프런트가 형성되는 것을 확인 할 수 있으며, (a)에 비해 (b)는 바람의 영향으로 인해 염분등간격선의 간격이 넓고, 성층구배가 완만한 것으로 나타났다.

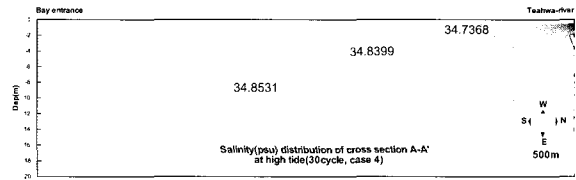
5. 결 론

본 연구에서는 담수유입이 존재하는 반폐쇄하구에서의 유동구조 및 성층구조를 규명하기 위하여 3차원 유동모델을 구축하고, 밀도류 형성이 예측되는 울산만을 대상으로 바람 및 담수유입이 유동장에 미치는 영향과 그에 따른 성층구조를 비교·분석하였다.

먼저 울산만과 같은 반폐쇄하구에 외력을 고려하지 않은 경우, 즉 바람 및 담수유입을 고려하지 않은 경우의 유동장은 창조시 북쪽으로 유입하고, 낙조시 남쪽으로 유출하는 경향을 띄고 있는 것으로 나타났다. 층별유속분포에 있어서는 표층과 저층간에 유속벡터의 크기 및 방향이 다소다르게 나타났다. 또한 울산만에 만내 방향으로의 바람이 부는 경우, 표층에서는 만내로 유입하는 흐름이 발생하였으며, 그에 대한 보상류로서 저층에서는 만외로 유출하는 흐름이 발생하는 것을 알 수 있었다. 하구에 담수유입이 존재하여 밀도류가 형성되면 표층에서는 만외로 유출하는 흐름이, 저층에서는 만내로 유입하는 흐름이 형성되어, 담수유입이 존재하는 하구역에 발생하는 대표적인 연직순환류인 하구순환류가 발생하는 것을 알 수



(a) Case 3

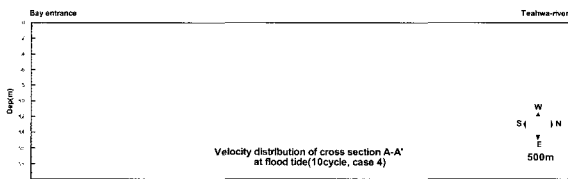


(b) Case 4

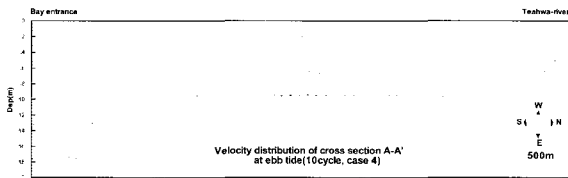
Fig. 12 Vertical salinity distribution at high tide

있었다. 그리고 밀도류 발생시 만내쪽의 방향으로 바람이 부는 경우 표층에서는 해수 및 담수가 바람에 의해 혼합이 되는 것을 알 수 있었다. 울산만을 대상으로 하여 바람 및 담수유입을 동시에 고려하여 수치실험을 한 결과, 만입구부에서는 바람에 의한 영향이 강하게 나타났으나, 전반적으로 밀도류에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

위의 결과 등을 통해 울산만과 같이 담수가 유입하는 반폐쇄하구에서는 수심평균한 2차원 유동모델로는 수평방향 및 연직방향의 복잡한 유동장을 표현하는 것은 어려울 것으로 판단되며, 특히 밀도류 및 취송류와 같은 연직순환류의 경향을 띄고 있는 유동장의 해석에 있어서는 3차원 유동모델의 도입이 필수적인 것으로 사료된다. 또한 이러한 3차원 해수유동결과는 하기 동해안에 나타나는 연안 용승류 및 기타 해양복장조성을 위한 어초투하, 연안표사제어를 위한 잠제건설, 해저산맥 조성 등의 지형변화로 인한 연직방향으로의 용승현상에 대한 규명이나 심층수 활용을 위한 기초연구에 적용이 가능하리라 생각된다.

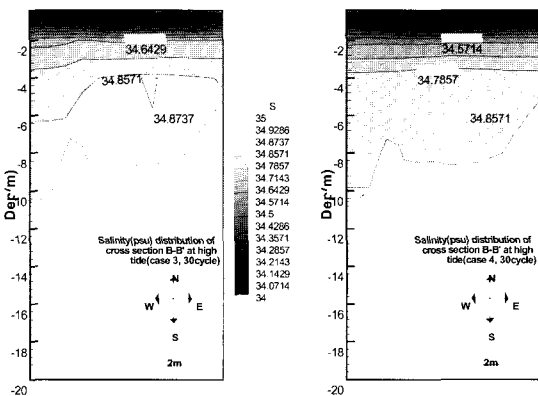


(a) flood tide



(b) ebb tide

Fig. 10 Vertical velocity distribution of A-A' cross section of Case 4



(a) Case 3

(b) Case 4

Fig. 11 Vertical salinity distribution at high tide

참 고 문 헌

- [1] 김상훈(2001), 성층해역에서의 유동구조에 관한 3차원 수치모형실험, 석사학위논문, 부산대학교.
- [2] 강태순(1999), 3차원 해수유동모델을 이용한 남해동부유역 해수유동 특성연구, 석사학위논문, 부경대학교.
- [3] 朴童津(2003), 閉鎖性層海域の流動特性および海水交換技術に關する研究, 九州大學博士學位論文.
- [4] 柳哲雄, 沿岸海洋學(海の中のものはどう動くか), 恒星社 厚生閣, 1994. 3.
- [5] 高津治(1991), 閉鎖性水域における密度成層のモデル化, 大阪大學修士學位論文.
- [6] 中村由行(1989), 内湾の熱收支と貧酸素水塊の形成について, 長岡技術科學大學研究報告, 第11号, pp. 69-81.
- [7] Backhaus, J. O.(1985), "A three-dimensional model for

- the simulation of shelf sea dynamics", Dtsch. Hydrogr. Z., Vol. 38, pp. 165-187.
- [8] Brebbia, C. A. and Partridge, P. M. (1976), "Quadratic Finite Elements in Shallow Water Problems", J. of Hydraulic Div., ASCE, Vol. 102, No. 9.
- [9] Smagorinsky, J., Manabe, S., and Holloway, J. L.(1965), "Numerical results from a nine level general circulation model for the atmosphere", Mon. Weather, Vol. 93, pp. 727-768.
- [10] Ueda, H., Mitsumoto, A., and Komori, S. (1981), Bouyancy effects on the turbulent transport Process in the lower atmosphere", Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 107, pp.561-578.
- [11] Van Rees, A. J.(1975), "Experimental results on exchange coefficients for non-homogeneous flows", Proc. XVI Congr. IHAR, Brazil Vol. 3, No. 109.

원고접수일 : 2003년 12월 29일

원고채택일 : 2004년 2월 13일