

부산북항 재개발에 따른 유동장 및 해수교환 변화 모의

금동호* · 김강민** · 이증우*** · 전성환***

*부산항만공사 건설사업부

**세일종합기술공사 기술연구소

***한국해양대학교 토목환경공학과

Simulation of Flow field and Water exchange Change on the Redevelopment of Busan North Port

Dong-Ho Gum* · Kang-Min Kim** · Joong-Woo Lee*** · Sung-Hwan Jun***

*Busan Port Authority, Jungang-dong 4ga, Jung-gu, Busan 600-817, Korea

**Seileng Engineering Co., Ltd. Shingil-dong Yeongdeungop-gu, Seoul 150-051, Korea

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

요약 : 부산항(북항) 재개발사업은 노후화된 북항 일반부두를 해양관광의 중심지역 그리고 부산시민을 위한 친수공간으로 개발하기 위해 그동안 많은 연구와 노력이 진행되어 왔으며, 현재 구체적인 방안이 모색되는 실행단계로 진입하였다. 한편, 재개발로 인한 유동장 및 해수교환의 변화는 환경적인 측면에서 중요한 검토사항 중 하나이다. 본 연구에서는 북항 재개발에 따른 일반적인 자료를 수집·분석하고, 이를 바탕으로 하여 재개발에 따른 유동장의 변화와 만내수의 해수교환을 수치실험으로 검토하였다. 실험결과, 조류속 변화는 북항 및 내항에서 감소가 나타나고 주수상에서 증가가 나타나고 있다. 해수교환 변화는 15일이 지난 준정상상태에서 재개발 전후 공히 약 77% 내외에 달하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 친수공간, 유동장, 해수교환, 수치실험

ABSTRACT: In connection with redevelopment of Busan North Port, there has been lots of studies and efforts for the development of superannuated North general piers into a center of marine tourism and waterfront for the citizens of Busan. Recently it has moved to the stage of execution, after several trials to find concrete solutions. On the other hand, the change of flow field and tidal exchange caused by redevelopment is one of the important investigation subjects. This study deals with the change of flow field and water exchange after redevelopment using numerical simulation technique, based on the general data which were collected and analyzed. As a result of simulation, the speed of tidal currents are tended to decrease near the North and inner-port and increase at the main waterway. Furthermore, the tidal exchange had a tendency to be small both before and after redevelopment by about 77% in a quasi steady state, which is about 15 days after.

KEY WORDS : Waterfront, Flow field, Tidal exchange, Simulation

1. 서 론

1876년 '부산포'란 이름으로 개항한 부산항은 동북항 간선항로의 지리적 이점과 지속적인 항만서비스 향상을 통해 오늘날 세계 5대 컨테이너 항만이자 3대 환적 중심항만으로 자리매김하였다. 부산항의 이같은 놀라운 발전은 개항 이래 줄곧 우리나라의 수출입 관문이었던 북항 일반부두의 눈부신 역할에 힘입은 바 크다고 할 수 있다. 날로 증가하는 부산항 컨테이너 화물을 효율적으로 처리하기 위하여 착수한 부산 신항만 건설로 북항

재래부두의 기능재편이 필요하게 되었고 이에 따른 북항 재개발 마스터플랜이 수립되었다.

부산 북항 재개발의 큰 목표는 크게 국제 해양관광 거점개발, 해륙교통 요충지개발, 친환경/시민참여형 도시개발로 볼 수 있으며 이러한 목표를 위해 전제되어야 할 조건은 환경친화적 개발이라 할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 북항 재개발로 인하여 발생할 수 있는 해수순환 양상에 중점을 두어 유동장의 변화를 파악하고 나아가 해수교환에 미치는 영향을 모의하고자 하였다.

본 연구에서는 조석모델링을 통하여 해수순환 및 해수교환 양상을 파악하고 그 변화를 분석하였으며, 이후 유동장을 외력으로 하여 입자추적실험을 수행하고 만내수의 항내 체류시간 및 항내에 투여된 입자의 거동특성을 분석하였다.

* dhkeum@pba.or.kr

051)999-3278

** kikami@seileng.com

02)840-5182

*** jwlee@hanara.hhu.ac.kr

051)410-4461

**** skyjeun820@hanmail.net

051)404-5241

2. 사용모델의 개요

2.1 유동 모형(POM-2D)

수치모의에 사용된 모델은 잘 알려진 POM(Princeton Ocean Model)로서 3차원 연안해양 수치모델로서 그 프로그램 코드가 공개되어 세계적으로 검증받은 바 있으며, 국내에서는 한국해양연구원, 인하대학교, 군산대학교 등이 한국 연근해에 성공적으로 적용시킨 바 있다. 자세한 설명은 Blumberg(1977) 등을 참고해야 한다.

급회 수치모의에서는 2차원 모드(2-D Circulation)에 의해 계산을 수행하였으며 연직적으로 적분된 기본 방정식은 다음과 같다. 모드분리(Simans(1974), Madala and Piacsek(1977))로 알려진 이 기법은 속도와 열역학적 특성의 3차원 계산으로부터 개별적으로 속도수송을 풀어버림으로써 계산시간에 있어서 조금의 손실도 없이 자유 수면승강을 계산한다.

외부모드 방정식의 체적수송은 깊이에 대한 내부모드 방정식을 적분하는 것으로 얻어진다. 그것에 의하여 모든 연직구조는 제거되어 진다.

외부 모드와 내부모드의 지배방정식은 (x, y, z, t) 에서 (x^*, y^*, σ, t^*) 로 변형된다. 여기서, $x^* = x, y^* = y, \sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta}, t^* = t$ 이다. $\sigma = -1$ 에서 $\sigma = 0$ 까지 연속방정식을 적분하고 경계조건($w(0)=w(-1)=0$)을 사용하여 다음과 같이 수면변위에 대한 방정식을 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

그리고 운동량 방정식은 연직적분한다.

$$\frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial y} - f\bar{V}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - D\bar{F}_x \quad (2)$$

$$= -\overline{wu}(0) + \overline{wu}(-1) - \frac{\partial D\bar{U}'^2}{\partial x} - \frac{\partial D\bar{U}'\bar{V}'}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' d\sigma + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial x} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \sigma' \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma d\sigma'$$

$$\frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} + f\bar{U}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - D\bar{F}_y \quad (3)$$

$$= -\overline{wv}(0) + \overline{wv}(-1) - \frac{\partial D\bar{U}'\bar{V}'}{\partial x} - \frac{\partial D\bar{V}'^2}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' d\sigma + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial y} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^0 \sigma' \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma d\sigma'$$

여기서, $D = H + \eta$ 이고, 연직적분된 속도는 다음과 같이 정의된다.

$$(\bar{U}, \bar{V}) \equiv \int_{-1}^0 (U, V) d\sigma \quad (4)$$

바람응력 성분은 $-\overline{wu}(0), -\overline{wv}(0)$ 이고, 저면응력 성분은 $\overline{wu}(-1), \overline{wv}(-1)$ 이다.

$U', U'V', V'^2$ 을 포함하는 식(2), (3)의 항들은 연직적분(평균)속도로부터 출발한 속도의 외적의 연직 평균으로 표현된다.

그리고 그것은 종종 분산항을 나타내기도 한다. 이와 같이 +

$$(\overline{U'^2}, \overline{U'V'}, \overline{V'^2}) = \int_{-1}^0 (U'^2, U'V', V'^2) d\sigma \quad (5)$$

여기서, $(U', V') = (U - \bar{U}, V - \bar{V})$ 이다.

\bar{F}_x, \bar{F}_y 의 양은 수평운동량 확산의 연직적분이고 다음과 같이 정의된다.

$$D\bar{F}_x = \frac{\partial}{\partial x} (2A_M \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} A_M (\frac{\partial \bar{U}D}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial x}) \quad (6)$$

$$D\bar{F}_y = \frac{\partial}{\partial y} (2A_M \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} A_M (\frac{\partial \bar{U}D}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial x}) \quad (7)$$

계산방법은 조석운동을 푸는 단시간 단계를 포함하는 천해파 방정식(1), (2), (3)을 외부모드를 이용하여 방정식을 푸는 것이다. 외부모드 해는 시간에 고정된 식(2), (3)의 오른쪽 항을 얻을 수 있고 큰 시간 스텝 후, 100차수 후에 내부모드 계산이 수행된다.

수치 모델 적용시 수평 와동 점성 계수로 상수 값을 사용하기도 하나, 아래의 식과 같이 격자 크기와 유속장을 수평 와동 점성 계수에 관련시킨 Smagorinsky type diffusivity가 보다 발전적이다(Smagorinsky, 1963; 한국해양연구소, 1993).

$$A_M = c \Delta x \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2} \quad (8)$$

여기서, c : 무차원 상수

$\Delta x, \Delta y$: x-방향과 y-방향의 격자 크기

본 수치 모델링에서는 수평와동 점성계수로 Smagorinsky type diffusivity에 수심 적분으로 인한 분산 효과(dispersion effect)를 고려하여 사용하였으며, 수평 난류 확산 계수는 수평 와동 점성 계수와 같은 값을 사용하였다.

격자구조는 엇갈림 격자(staggered grid)에 속하는 Arakawa C-grid를 이용하였으며, 기본 방정식은 flux-conservative form으로 표현하여서 방정식을 차분화할 때 질량과 에너지의 보존에 유의하였고, 차분화 방법으로는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용함으로써 질량과 부피 보존이 잘 되게 하였다. 수면 경사를 반올림법으로, 수평 확산항을 CS(Centered Space)법으로 해석하였고, 시간에 대하여는 leapfrog scheme을 사용하였다. 운동 방정식의 이류항은 CS법으로 해석하였고, 물질 보존 방정식의 이류항은 BS(Backward Space)법으로 해석하였다.

시간 미분항을 차분화하는데 three-time level scheme인 leapfrog scheme을 이용하면 Coriolis항을 처리하는데 유리하지만 각 time step마다 physical mode와 computational mode를 형성하는 time-step splitting이 생긴다(Roache, 1972). Time-step splitting으로 인한 불안정성(instability)을 제거하기 위해 Euler-backward scheme(Blumberg, 1977; Wang and Kravitz, 1980)이나 weak time filter(Asselin, 1972; Blumberg and Mellor, 1987)를 적용한다(Park and Kuo, 1993).

본 모델링에서의 수치해는 각 time step(n)마다 아래 식(Asselin, 1972)을 이용하여 평활화(smooth)되었다.

$$T_s^n = T^n + \frac{\alpha}{2} (T^{n+1} - 2T^n + T_s^{n-1}) \quad (9)$$

여기서, T: unsmoothed numerical solution

Ts: smoothed solution

$\alpha=0.05$

수심 적분된 기본 방정식에서 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 수치 안정 조건은 다음과 같다(Blumberg and Mellor, 1987).

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_t} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (10)$$

여기서, $C_t = 2\sqrt{gH} + U_{\max}$

U_{\max} : 최대 수심평균 속도

모델링에서 바람 응력의 효과는 고려하지 않았고, 해수 유동장에 대한 초기조건은 해수 유동이 없는 것(cold start)으로 설정하였다.

해수 유동의 폐경계 조건으로 육지 경계면을 가로지르는 유량은 없다고 하였고, 저면 마찰은 Manning의 마찰 계수를 이용한 quadratic stress law를 사용하였다.

$$\vec{\tau} = C_D \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U} \quad (11)$$

여기서, $C_D = gn^2 \Delta z^{-1/3}$

n: Manning의 마찰 계수

Δz : bottom layer thickness

(수심 적분된 경우는 total 수심)

조위의 개방 경계 조건으로 개방경계면에 위치한 관측자료를 이용하여 외해측 개방 경계에서 M2, S2, K1, O1 분조에 의한 조위 변화를 관측 자료에 근거하여 시·공간 함수로 주었다.

조류의 개방 경계 조건은 다음과 같이 처리하였다. 개방 경계에 수직(normal)한 속도 성분은, 모델 영역 외부의 속도 성분을 필요로 하는 이류항(advective term)과 수평 와동항(horizontal eddy viscosity term)을 무시하고 운동 방정식을 풀어 구하였다. 개방 경계에 접한(tangential) 속도 성분은, 흐름이 모델 영역 외부로부터 내부를 향할 때는 내부 값과 같은 값으로 처리하였고, 흐름이 모델 영역 내부로부터 외부로 향할 때는 아래 식에 의해 구하였다.

$$\frac{\partial U_t}{\partial t} + U_n \frac{\partial U_t}{\partial x_n} = 0 \quad (12)$$

여기서, U_t : 개방 경계에 접한(tangential) 속도 성분

U_n : 개방 경계에 수직(normal)한 속도 성분

x_n : 개방 경계에 수직(normal)한 좌표(coordinate)

2.2 입자추적 모형(Random-Walk)

수심적분된 물질보존방정식은 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hc)}{\partial t} + \frac{\partial(UHc)}{\partial x} + \frac{\partial(VHc)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{xy} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, c는 수심평균된 물질의 농도이다. 그리고 D는 분산계수에 관한 Tensor로서 식(14)와 같으며, 유향이 x축과 이루는 각도 $\theta = \tan^{-1}(V/U)$ 이면 적절한 축변환한 형태는 식(15)과 같다.

$$D = \begin{vmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_L & 0 \\ 0 & D_T \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$D_{xx} = D_L \cos^2 \theta + D_T \sin^2 \theta \quad (15a)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2 \theta + D_T \cos^2 \theta \quad (15b)$$

$$D_{xy} = (D_L - D_T) \sin \theta \cos \theta \quad (15c)$$

여기서, D_L 및 D_T 는 각각 이류속도벡터와 평행한 종방향 분산계수 및 직각 방향의 횡방향 분산계수로서, 수심적분된 형태의 모형화에서는 D_L 의 경우 흐름방향의 순수한 난류확산 뿐만 아니라 수평속도의 연직적 전단과 연직방향의 난류확산 사이의 상호작용에 기인하는 효과도 포함하고 있다(Jozsa, 1989).

입자의 측면에서 직접적으로 이해할 수 있는 식의 형태로 만들기 위하여, 수심적분된 농도 $C = Hc$ 라는 새로운 변수를 도입하여 식(13)을 재배열하면 식(16)과 같다(Jozsa, 1989; Lee and Kim, 1995a).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(U^*C)}{\partial x} + \frac{\partial(V^*C)}{\partial y} \\ = \frac{\partial^2(D_{xx}C)}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2(D_{xy}C)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2(D_{yy}C)}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, 표류속도벡터 $U^* = (U^*, V^*)$ 는 식(17)과 같다.

$$U^* = U + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \quad (17a)$$

$$V^* = V + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x} + \frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (17b)$$

만약 C가 어떤 확률분포함수로서 취급된다면 식(16)은 Fokker-Planck 방정식(Cushman, 1987)과 항등이다. 식(17)과 같이 수정된 이류속도성분으로부터 Random-Walk 입자법을 다음과 같이 기술할 수 있다(Jozsa, 1989; Lee and Kim, 1995). Lagrange적인 취급을 위하여, 연직적으로 균질하게 혼합된 어떤 물질의 질량 M을 어떤 점에서 순간적으로 방출하는 경우를 고려하고 이 물질은 흐름과 함께 이동한다면, 흐름 속에서 Nro의 입자에 대한 등가질량 $m = M/N$ 을 생각할 수 있으며, 속도장의 Euler 적분을 사용하여 간단히 이들 입자를 추적할 수 있다. 즉, 시간증분 Δt 에 대하여 주어진 어떤 입자의 새로운 위치벡터는 식(18)과 같다.

$$X(t + \Delta t) = X(t) + u(X(t), t) \Delta t \quad (18)$$

여기서, 속도벡터 u는 표류속도 U^* 와 불규칙한 분산속도 u' 의 합으로 식(19)과 같다.

$$u = U^* + u' \quad (19)$$

분산계수가 수심과 전단속도에 비례한다는 Elder(1959)의 개념을 도입하면, 종분산계수 및 횡분산계수는 식(20)과 같다.

$$D_L \approx 6.0Hu_* \quad (20a)$$

$$D_T \approx 1.5Hu_* \quad (20b)$$

여기서, 식(20)의 상수값은 문헌에서 발견된 값의 평균치이며, 종방향 속도 u_L 및 전단속도 u_* 는 식(21)과 같다.

$$u_L = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (21a)$$

$$u_* = \frac{\sqrt{g}}{C} u_L \quad (21b)$$

Lagrange 방법으로 분산을 모의실험하기 위해서는 해석해와 확률적인 동등이 충족되어야 한다. 즉, 적절한 표준편차 (Zannetti and Al-Madani, 1983)를 가진 각 입자들에 대하여 불규칙한 분산속도성분을 부가하여 생성된 입자분포가 해석해와 확률적으로 항등이어야 한다. 이에 따른 불규칙한 분산속도 성분은 식(22)와 같다.

$$u'_L = R_1 \sqrt{2D_L/\Delta t} \quad (22a)$$

$$u'_T = R_2 \sqrt{2D_T/\Delta t} \quad (22b)$$

여기서, R_1 과 R_2 는 평균치 0 및 표준편차 1의 정규분포를 갖는 난수이고, x 및 y방향의 불규칙한 분산속도성분은 축변환에 의하여 식(23)과 같다.

$$u' = u'_L \cos\theta - u'_T \sin\theta \quad (23a)$$

$$v' = u'_T \sin\theta - u'_L \cos\theta \quad (23b)$$

이상과 같은 물질보존에 관한 입자추적 알고리즘은 Lee and Kim(1995)에서 사용된 Code를 기본적으로 사용하였다. 이 때 계산격자는 흐름장 계산에서 사용된 것과 동일한 것을 사용하였으며, 식(17)에서 미분항은 중앙차분 양해법을 사용하여 표류속도를 계산하였다. 또한 동일한 Cell 내에서 각각의 값들은 동등하게 취급하지 않고 Cell 내의 입자위치에 따라 그 값을 선형보간하여 사용하였다. 그리고 입자가 고정경계에 도달한 경우에는 반사경계조건을 사용하였으며, 개방경계에 도달하여 계산영역을 Outgoing한 입자는 제거하였다.

한편, 조류는 왕복성 흐름이므로, 만약 해수입자가 선형적인 왕복운동에 의하여 한 조석주기 후 원래의 위치에 되돌아오면 해수교환이 발생하지 않는다. 그러나 실제 해역에서는 비선형적인 해수운동 및 지형적인 요인에 의하여 조석간차류가 발생하며 이에 따라 해수의 순이동 즉, 해수교환이 발생한다. 이에 대하여 Parker et al.(1972)은 창조류에 의한 유입량 중 처음으로 만내에 유입하는 외해수가 차지하는 비율 혹은 낙조류에 의한 유출량 중 처음으로 만외로 유출하는 만내수가 차지하는 비율을 '치환에 의한 해수교환율'이라 정의하였다. 中田·平野(1976) 등은 실제 해양에서 Buoy를 추적하여 이러한 것은 표현하려고 하였으나 여러 개 Buoy의 동시추적을 현지해양에서 수행하는데 상당한 어려움이 있었으므로, Awaji et al.(1980)은 수치실험을 이용하여 즉, 이미 얻어진 흐름장에 여러 개의 표지입자를 투입해 그 궤적을 구해서 그 해역의 해수교환을 이해하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 개념을 도입하여 해수교환율을 식(24)와 같이 나타내었다.

$$E_V = \frac{V_{OUT}}{V_{TOTAL}} \approx \frac{P_{OUT}}{P_{TOTAL}} \quad (24)$$

여기서, E_V 는 해수교환율, V_{OUT} 는 경계외측으로 수송된 해수체적, V_{TOTAL} 은 경계내측의 초기해수체적, P_{OUT} 는 초기입자 투입영역 외측으로 수송된 입자수, P_{TOTAL} 은 경계내측의

초기입자수이다.

3. 수치 모의

3.1 개요

본 연구에서는 북항 및 인근 해역의 해황을 재현하기 위하여 서쪽으로 다대포, 동쪽으로 대변항을 포함하고, 남쪽은 20km 외해역까지를 포함한 광역 모형을 구축하고 광역 모형의 결과(Fig.1)를 바탕으로 북항 재개발로 인한 유동 재현성을 발휘할 수 있도록 최소격자를 15m로 하는 세역 모형을 구축하였다. 세역 모형은 계산 시간의 경제성을 감안하여 북항 재개발 구역을 중심으로 15~120m에 이르는 가변격자를 사용하였다. 또한, 광역 모형의 경우 세역 모형의 경계조건을 추출하기 위하여 35일간 모델링을 수행하였으며, 세역 모형은 이를 근거하여 대,중,소조기가 포함되는 15일 동안에 걸쳐 수치모의를 수행하였다. 동천, 부산천, 초량천, 보수천에서 하천유량은 평수시로 입력하였으며, Table 1에 개략적인 해수유동 실험의 개요를 정리하였다. 세역 모형의 격자망도는 Fig. 2에 제시하였다.

Table 1 Summary of model simulation set up

구분	광역	세역
목적	세역 모형 경계조건 추출	계획안에 대한 해수유동 현황 해양환경 예측 기초자료 제공
모델	POM(Princeton Ocean Model)	
범위	다대포, 대변항을 포함한 일대 해역(30.0km×25.0km)	사업지구 부근 해역(8,010m×4,425m)
격자	150 × 125 (18,750개) ΔS=200m	242 × 140 (33,880개) ΔS=15,30,60,120m
조건	35일간(M2+S2+K1+O1) n(마찰계수) : 0.023	15일간(M2+S2+K1+O1) n : 0.023
내용	현황 재현	현재 상태, 계획안

입자추적 실험은 해수유동 실험의 외력장인 조위, 조류자료를 입력치로 하여 초기입자 투입영역에 입자를 부여하여 거동특성을 분석하였으며, 이를 기초로 하여 해수교환율을 산정하였다. Fig. 3에 초기입자 투입영역을 제시하였다. 투입영역은 제1,2,중앙부두,3,4,5부두를 포함한 영역으로 하였으며, 15일 동안 수치모의를 수행하였다.

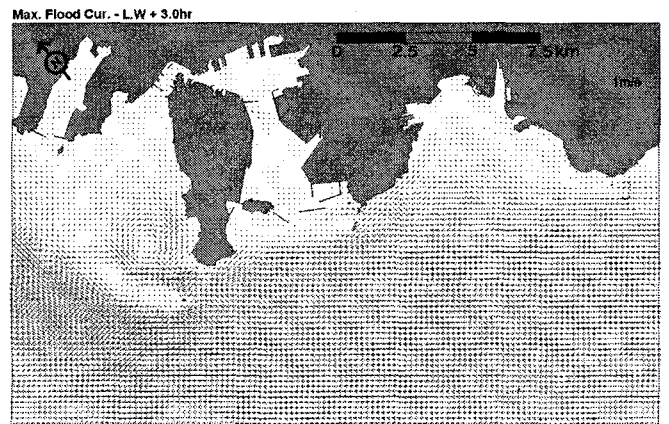


Fig. 1a Flood and ebb currents in the wide region

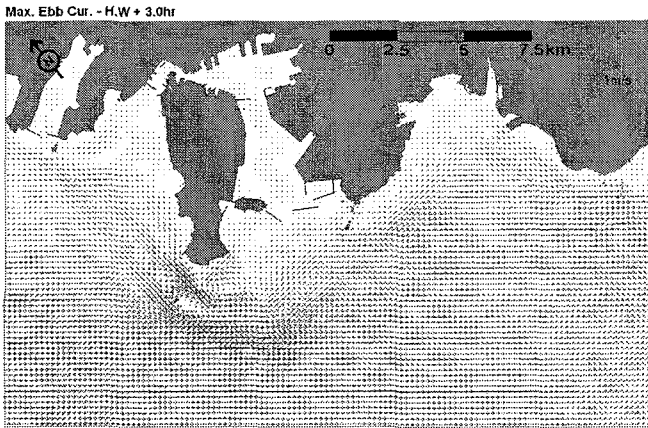


Fig. 1b Flood and ebb currents in the wide region

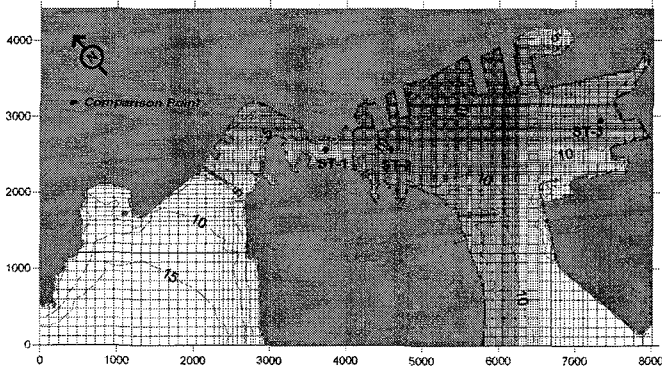


Fig. 2 Mesh and water depth for the narrow region

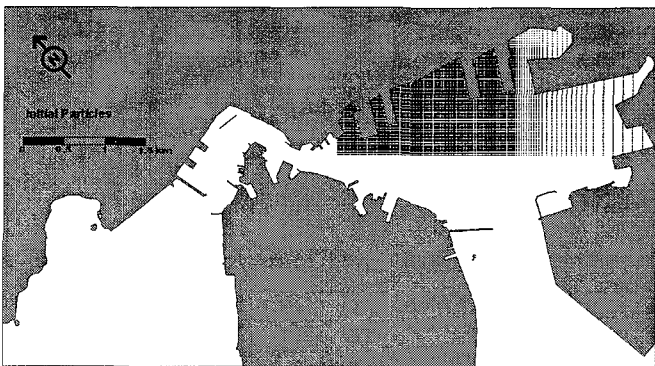


Fig. 3 Region for the initial particle input

3.2 모형의 검증

모형의 검증을 위하여 광역 및 세역 모형에 대하여 각각 조위 및 조류검증을 수행하였다. 검증 결과 조위의 경우, 97% 이상, 조류의 경우, 75% 이상의 정확도를 보였다(Fig. 4, 5).

실험결과, 창조류는 감만부두와 남방파제 사이에서 유입되어 내항에서 감속되고 제1부두와 연안부두를 통과하면서 가속화하여 영도다리 부근에서 100cm/sec까지의 최대 유속을 나타내며 남향 부근에서 다시 감속되었다가 남향동 전면에 위치한 방파제 사이의 협수로에서 다시 가속화되어 유출되며, 낙조류는 이와 반대의 양상을 보인다. 북향 부근은 10cm/sec내의 유속분포를 나타내고 있다(Fig. 6).

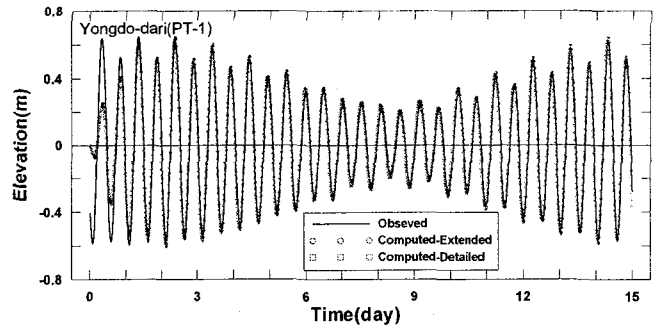


Fig. 4 Tide verification curves (wide and narrow)

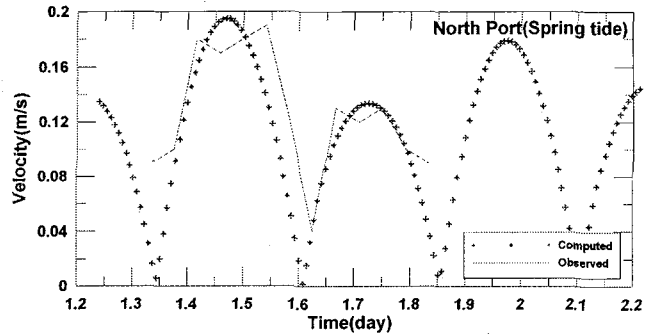
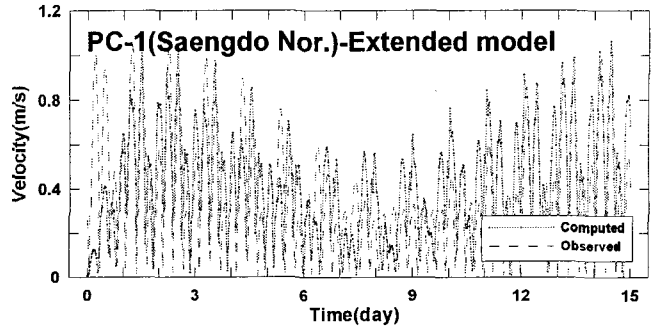


Fig. 5 Current verification curves (narrow)

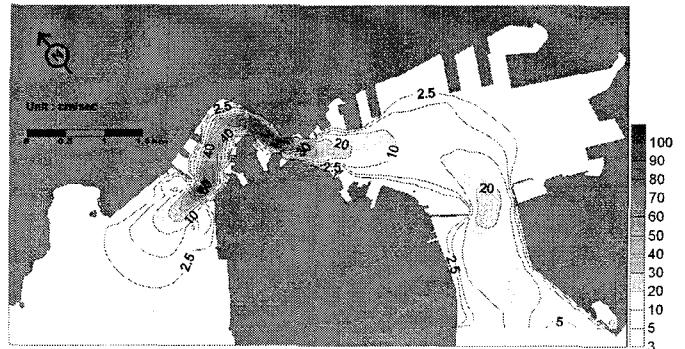


Fig. 6 Distribution of maximum current velocities

3.3 해수유동 변화

북향 재개발로 인한 최강 창·낙조시 유속분포는 Fig. 7, 8에 제시된 바와 같이, 주소로상에서는 최대 4~6cm/sec의 증가가, 북향 부근 및 감만부두 전면에서는 최대 8~10cm/sec 까지의 감소가 나타나고 있다. 전반적인 변화는 3cm/sec 내외의 증감으로 나타났으며 지형변화로 인해 수치표현상의 문제로 다소 튀는 값이 존재하는 것으로 판단된다.

격자망도에 표기된 비교정점을 기준으로 개발 전·후에 대한 최강유속을 비교하면 ST-1(부산대교 부근)에서 76.5cm/sec에서 76.9cm/sec로, ST-2(제1부근 전면해역)에서 23.5cm/sec에서 23.9cm/sec로, ST-3(제7부두 전면해역)에서 1.1cm/sec에서 1.0cm/sec로 수로상에서는 유속 증가가, 내만쪽에서는 유속 감소가 나타났다.

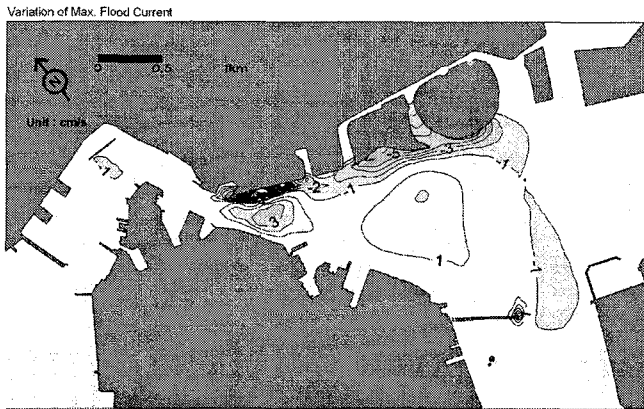


Fig. 7 Variation of maximum flood current

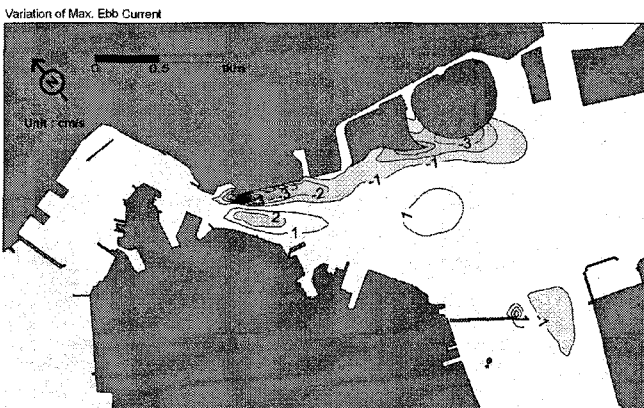


Fig. 8 Variation of maximum ebb current

3.4 해수교환율 변화 검토

실험은 15일 동안에 대하여 이루어졌으며, 입자거동 특성곡선을 바탕으로 해수교환율을 평가하였다. Fig. 9는 초기입자의 확산이 가장 크게 일어났을 것으로 여겨지는 대조기가 지나고 증조기 시점인 100시간(=4.2일) 이후의 입자 확산 결과, 주수로상의 유속감소로 인하여 투여된 입자가 감만부두 방향으로 많이 유출되어 항 밖으로 향하는 양상을 보이며, 자성대부두와 7,8부두 부근 내만의 순환 양상이 다소 정제되고 있다.

입자추적 실험 결과를 바탕으로 계산한 해수교환율은 4일까지 급격한 해수교환 효과를 나타내게 되는데, 이는 대조, 증조기간이 지난 시점이기 때문으로 생각되며, 소조가 끝나고 증조, 대조가 다시 시작하는 시점인 12일 이후에 다시 해수교환율이 증가되는 경향을 보이고 있다. 4일 이후 해수교환율은 현재 상태는 44.4%, 개발 후는 44.3%, 12일 이후에는 70.0%, 72.1%로 개발 후의 해수교환율이 오히려 높아지는 것으로 나타났다

(Fig. 10). 또한, 15일 정도의 준 정상상태에 이르면 개발 전후에의 차이는 거의 없어지며 해수교환율이 77%에 달하는 것으로 나타났다.

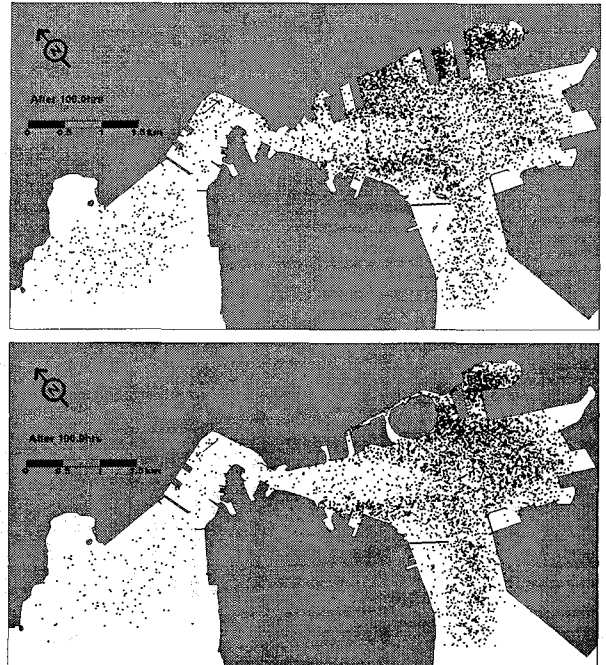


Fig. 9 Characteristics of particle movement after 100hours

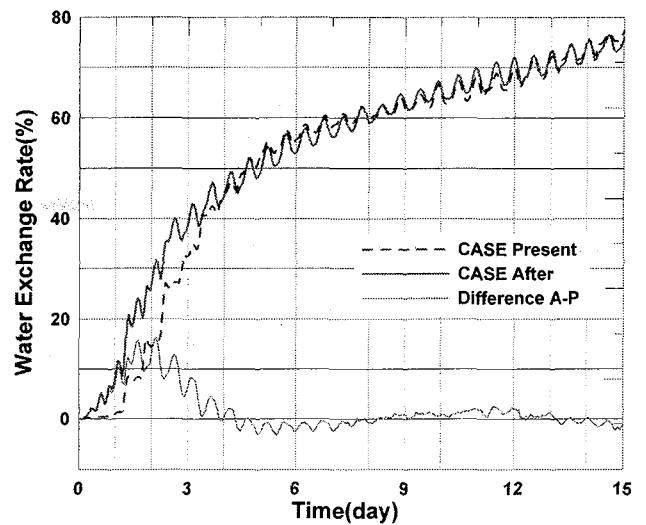


Fig. 10 Comparison of water exchange rates

4. 결론

본 연구에서는 북항 재개발로 인한 해수 유동과 해수교환 변화를 수치실험에 의하여 모의하였다. 해수 유동장의 변화는 POM모형의 2차원 모드를 적용하여 개발 전·후의 해수유동을 실험하였고, 이후 유동장 결과를 외력장으로 하여 입자추적 실험을 통하여 입자 거동 특성을 분석하였으며 이를 근거로 하여 해수교환율을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

1) 부산 남향·북향의 해수순환 양상은 감만부두와 남방파제 사이로 유입된 창조류는 20~25cm/sec 내외의 분포를 보이며 내향에서 10cm/sec 이내로 감속되었다가 제1부두와 봉래동 사이 해역에서 다시 가속된다. 또한, 부산대교-영도다리에서 최대 100cm/sec까지 유속분포를 보이며 남향쪽으로 유출되고 낙조류는 이와 반대의 양상을 보인다.

2) 북향 재개발로 인한 해수유동 변화는 창·낙조류 모두 주수로상에서는 최대 6~8cm/sec까지의 증가가 나타나고, 북향 및 내향 부근에서는 최대 8~10cm/sec까지의 감소가 나타났다. 전반적으로 최대 유속변화는 극히 일부를 제외하고는 대부분 1~2cm/sec 내외의 미세한 증감을 보였다.

3) 시간에 따른 입자거동은 개발전의 경우 계산영역을 중심으로 동쪽과 남쪽으로 확산이 비교적 균형적으로 일어나지만, 개발후의 경우 남쪽으로의 확산 거동이 우세하게 나타난다.

4) 입자거동 결과를 바탕으로 한 해수교환을 평가 결과, 대조 시기인 48시간(2일) 후 개발 전·후 각각 14.4%, 26.8%로 나타났으며, 증조기간인 125시간(5.2일) 후에는 55.3%, 54.4%로, 소조기간인 192시간(8일) 후에는 60.0%, 59.9%로 나타나, 대조, 증조기간까지는 개발 후의 해수교환율이 우세하지만 이후부터는 개발 전과 후의 차이는 1~2%로 극히 미세한 것으로 분석되었다.

부산북향 재개발에 따른 해양환경적 변화를 예측할 수 있는 해수유동장 변화와 해수교환을 평가를 수행하였다. 검토 결과, 재개발에 따른 환경적 영향은 미미할 것으로 판단되지만 매립면적의 확대로 인하여 북향의 기존 수제선 부근 및 동천부근 내향쪽에 유속 저감이 일어나기 때문에 해수교환 시설의 확충 및 오염원 관리는 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 한국해양연구소 (1993), 해양환경 관리기술-오염물질 이·확산 예측기술 개발. 환경처. p. 81.
 [2] 中田英明, 平野敏行(1976), 瀬戸水域における海域の交流・交換について, 日本水産海洋研究會報, 29, p. 724.
 [3] Asselin, R. (1972), Frequency filter for time integrations. Monthly Weather Review, 100(6): pp. 487-490.
 [4] Awaji, T., Imasato, N. and Kunishi, H. (1980), Tidal exchange through a strait : A numerical experiment using a simple model basin, J. Physical Oceanogr., 10, pp. 1499-1508.
 [5] Blumberg, A.F. (1977), Numerical model of estuarine circulation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 103(HY3), pp. 295-310.
 [6] Blumberg, A. F., and G. L. Mellor (1987), "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coastal Model", Vol.4, edited by N. Heaps, American Geophysical Union, Washington, D.C.
 [7] Cushman, J.H. (1987), Development of stochastic partial differential equations for subsurface hydrology. Stoch. Hydrol. Hydraul., Springer-Verlag, 1(4), pp. 241-262.
 [8] Elder, J.W. (1959), The dispersion of market fluid in

turbulence shear flow. J.Fluid Mech., 5, Part 4, pp. 544-560.

[9] Jozsa, J. (1989), 2-D particle model for predicting depth-integrated pollutant and surface oil slick transport in rivers. Proc. Int. Conf. on Hydraulic and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters, Univ. of Bradford, Bradford, Sep., Paper No.30, pp. 332-340.
 [10] Lee, J.S. and Kim, H.J. (1995), Sensitivity analysis of diffusion solutions by random walk method. J. Korean Soc. of Civil Eng., 15(5), pp. 1267-1277.
 [11] Madala, R. V. and S. A. Piacsek (1977), "A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans", J. Comput. Phys., 23, pp. 167-178.
 [12] Park, D.S., Norris, D.P. and Nelson, A.W. (1972), Tidal exchange at Golden Gate. proc. of ASCE, 98, SA2, pp. 305-323.
 [13] Park, K. and A.Y. Kuo (1993), A vertical two-dimensional model of hydrodynamics and water quality. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering No. 321, School of Marine Science and Virginia Institute of Marine Science, The College of William and Mary, VA 23062. p. 47.
 [14] Roache, P.J. (1972), Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers. p. 434.
 [15] Simons, T. J. (1974), "Verification of numerical models of Lake Ontario, Part I. Circulation in spring and early summer", J. Phy. Oceanogr., 4, pp. 507-523.
 [16] Smagorinsky, J. (1963), General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. Monthly Weather Review, 91: pp. 99-164.
 [17] Wang, D. and D.W. Kravitz (1980), A semi-implicit two-dimensional model of estuarine circulation. Journal of Physical Oceanography, 10(3): pp. 441-454.
 [18] Zennetti, P. and Al-Madani, N. (1983), Simulation of transformation, buoyancy and removal processes by lagrangian particle method. Proc. 14th NATO/CCMS ITM, Copenhagen, Denmark, pp. 733-744.