

잔교식 항만구조물 주변에서 해수유동의 평가

박 일 흠[†]
여수대학교 해양시스템학부

Evaluation of Tidal Flow around the Pile-supported Pier Structures

Il Heum Park[†]

Division of Ocean System, Yosu National University, San 96-1 Dundeok-dong, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea

요 약

투과성 항만구조물 주변에서 해수유동을 평가하기 위하여, 흐름 저항을 고려한 수치모형을 사용하였다. 조석·조류 수치모형에서 임의 물체에 대한 흐름 저항을 고려하기 위하여 수심적분된 전통적인 동수력학 방정식에 항력항을 첨가하였다. 그리고 해수교환율을 평가하기 위하여 임의행보(random walk) 수치모형을 사용하였다. 본 모형은 부산항의 잔교식 항만구조물의 설계에 이용되었으며, 이 때 투과성 구조물은 불투과성 구조물의 경우보다 유속이 증가하고 해수교환율이 향상되는 결과를 보였다. 본 모형은 앞으로 투과성 구조물의 설계에 있어서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – To evaluate the tidal flow around the transmission type harbour structures, the numerical models considering hydraulic resistance are used. The traditional governing equations of depth-integrated hydrodynamics are modified by using of the drag force term. As a numerical model to evaluate the rate of tidal exchange, the Random-walk method is used. The models are applied in a design of the pile-supported pier structures in Busan harbour site, Korea, where the flow speed and the tidal exchange are more promotive than the case of non-transmission structure. The developed model will be applied usefully to design the transmission type structure in the ocean space.

Keywords: Tidal flow(해수유동), Hydraulic resistance(흐름 저항), Numerical model(수치모형), Transmission structures(투과성 구조물)

1. 서 론

흐름 중에 잠겨있는 각종 시설물들은 흐름 저항을 유발시킨다. 이들 구조물 배후에서는 후류와(wake)가 발생하며, 그 주변에서는 급격한 유속 및 수위 변화가 발생한다(Schlichting[1979]). 이러한 난류의 엄밀한 수치계산을 위해서는, 흐름의 경계층을 포함하며 아주 미세한 격자구조체계를 갖추어 순간유속장을 재현할 수 있는 LES(Large Eddy Simulation) 및 DNS(Direct Numerical Simulation)가 사용되고 있다(Arakawa[1994]). LES 및 DNS는 엄청난 기억용량과 계산시간을 요구하며, 일반적인 공학적 문제에서는 순간유속장에 대한 정보보다도 시간평균치만으로 충분한 경우가 대부분이므로 이러한 모형의 개발이 요구된다.

Reynolds 방정식을 이용하는 시간평균류 모형에서, 넓은 지역을 대상으로 흐름을 재현할 경우 각종 구조물의 단면적은 계산격자에 비하여 대체적으로 작으므로 구조물들을 무시하고 계산을 행하는 것이 일반적이었으며, 계산격자를 아주 세밀히 갖추거나 혹은 가변격자체계를 이용하여 그 구조물의 단면적이 계산격자와 상당한 경우에는 구조물의 단면형상에 관계없이 육지화하여 섬으로 처리하여 유동계산을 행하여 왔다. 즉, 계산격자가 구조물의 단면적에 비하여 너무 커서 구조물이 무시되는 경우에는 구조물 배후의 유동양상을 전혀 나타낼 수 없으며, 구조물의 형상에 관계없이 마치 섬처럼 취급하는 경우에는 흐름장에 대한 구조물의 영향이 과대평가될 우려가 있었다(박 등[1998]). 이에 따라, 박 등[1998]은 흐름 저항에 관한 수치모형을 개발하고, 해석해가 존재하는 조건에 대한 다양한 수치실험을 통하여 모형을 검증하였으며, 이와

[†]Corresponding author: ihpark@yosu.ac.kr

박[1995]은 수산증·양식 시설물에 대한 유수저항(hydraulic resistance) 수치모형을 개발하여, 수산시설물에의 적용성을 검토하였다.

본 연구에서는 흐름 저항을 유발시키는 항만구조물의 최적설계를 위한 기본적인 자료를 제공하기 위하여, 말뚝형 구조물에 대한 해수유통 및 해수교환율에 관한 수치모형을 구축하였다. 그리고 해수투과형의 잔교식으로 설계된 부산항 국제여객 및 해경 부두에 본 모형을 적용하여 그 결과를 토의하였다.

2. 대상해역

Fig. 1과 같이 부산항 조도 내측에 부산항 국제여객 및 해경 부두가 건설될 예정이다. 그림에서와 같이 대상해역은 조도, 영도 및 방파제 등으로 차폐되어 있어 흐름이 미약할 것이며, 해양오염에 취약할 것으로 판단된다. 따라서, 대안설계로서 부산항 국제여객 및 해경 부두를 해수소통이 가능한 잔교식 부두(pile-supported pier)로 계획하게 되었다.

부산항의 경우 조석의 특징은 조석형태수 $F=0.12$ 로서 반일주조형이며, 매일 2회의 만조와 2회의 간조가 나타난다. 대조차는 118 cm, 평균조차는 80 cm 그리고 소조차는 42 cm이며, 평균만조 간격은 8시 2분이다((주)한국해양과학기술[2003]), 또한, 부두설치 지점 부근에서 관측된 최대 창·낙조류의 크기는 10~12 cm/s 정도로서 아주 약한 흐름을 보인다((주)한국해양과학기술[2003]).

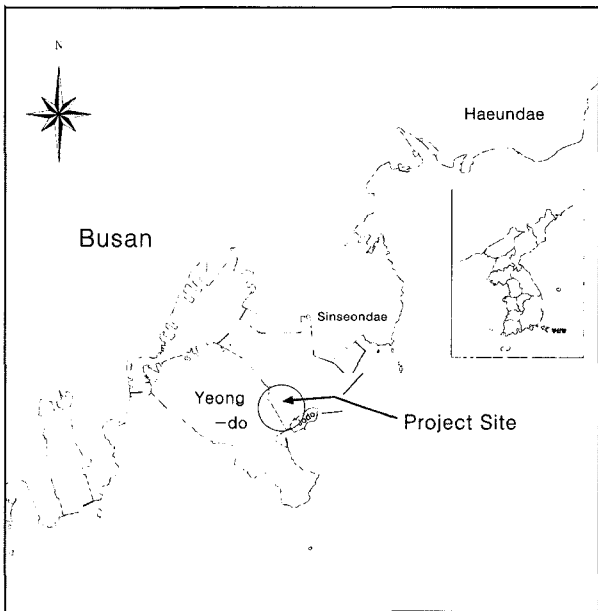


Fig. 1. Site map.

3. 조석·조류의 수치실험

3.1 수치모형의 개요

어떤 물체가 유체 속을 움직이는 경우 혹은 흐름 중에 어떤 물체가 놓여져 있는 경우 이 물체와 유체 사이에는 어떤 상호작용

이 발생하며, 이러한 효과는 유체와 물체 경계면에서 힘과 관련된 항으로 나타낼 수 있다. 이 힘은 점성효과에 의한 전단응력(shear stress) τ_w 와 압력 p 에 의한 법선응력(normal stress)의 항으로 기술될 수 있다. 그러나, 이러한 전단응력과 압력의 분포는 이론적·실험적으로 얻기가 매우 힘들므로 차원해석적 방법(dimensional analysis)에서 항력계수 C_D 를 도입하여 항력 F_D 를 식 (1)과 같이 유속에 관한 2차 식으로 나타낸다(Munson et al.[1994]).

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D V_a |V_a| \quad (1)$$

여기서, A_D 는 물체의 흐름 방향에 대한 투영면적 그리고 V_a 는 접근유속(approach velocity) 벡터이다. 항력을 평가하기 위해서는 C_D 의 결정이 중요하며, C_D 는 주로 물체의 형상과 Reynolds 수에 의존한다. 그리고, 물체가 흐름 중에 여러 개 존재할 경우, 항력은 식 (2)와 같이 단위면적당 항력 즉, 응력의 차원으로 나타낼 수 있다(박 등[1998]; 이와 박[1995]).

$$\tau_D = \frac{n}{2} \rho C_D A_D V_a |V_a| \quad (2)$$

여기서, n 은 단위면적당 저항물체의 개수이다.

Boussinesq 근사를 행한 Reynolds 방정식과 연속방정식을 연직 방향으로 Leibnitz 부분적분하면, 다음과 같은 수직적분된 유체의 운동방정식과 연속방정식을 얻을 수 있다(Falconer[1994]).

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta U^2 H) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta UVH) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz \\ - \epsilon H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta V^2 H) - fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} dz \\ - \epsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, β 는 운동량 보정계수, U, V 는 x, y 방향의 수심평균유속, H 는 전수심, g 는 중력가속도, f 는 Coriolis parameter, η 는 해면변위, h 는 수심, τ_x, τ_y 는 x, y 방향의 전단응력 그리고 ϵ 은 수심평균된 와동점성계수이다.

식 (3) 및 식 (4)의 전단응력항에 바람 및 저면에 의한 마찰을 고려하고, 식 (2)와 같은 단위면적당 항력을 도입하면 다음의 식 (6) 및 식 (7)과 같다(박 등[1998]).

$$\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz = \frac{\gamma \rho_a W_x W_s}{\rho} - \frac{g U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} - \frac{n C_{Dx} A_{Dx} U_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}}{2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} dz = \frac{\gamma \rho_a W_y W_s}{\rho} - \frac{g V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} - \frac{n C_{Dy} A_{Dy} V_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}}{2} \quad (7)$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, γ_n 는 해면에서 바람에 의한 마찰저항 계수, W_x, W_y 는 x, y 방향의 풍속, W_n 는 풍속 C' 는 Chezy 계수, C_{Dx}, C_{Dy} 는 x, y 방향의 항력계수, A_{Dx}, A_{Dy} 는 x, y 방향의 물체의 투영면적 그리고 U_a, V_a 는 x, y 방향의 접근유속이다.

상기의 식 (6) 및 식 (7)의 우변 3번째 항은 흐름 중에 놓여진 물체에 의한 항력을 고려한 항으로서 특히, n 값은 실제 계산격자 체계에서 식 (8)과 같이 표현되며, U_a 및 V_a 는 물체의 상류측 한 격자 앞의 값을 사용한다.

$$n_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (8)$$

여기서, $m_{i,j}$ 는 그 격자 내의 저항물체 개수 그리고 $\Delta x, \Delta y$ 는 x, y 방향의 계산격자간격이다.

본 모형의 기본방정식은 ADI법으로 풀어지며, 공간적으로 엇갈린 격자체계를 사용하였다. 계산영역에서 육상부의 경계는 간석지가 발달되어 있는 경우, 수위의 변화에 따라 폐경계의 위치가 변하는 이동경계를 취하고 있으며, 개경계에서 경계조건은 수위나 유속에 의한 제어가 가능하도록 구성되어 있다(Falconer[1991]; Falconer and Owens[1994]).

3.2 구조물 설치에 따른 해수유동 변화

대상해역에서 대조기동안 계산된 조류 계산결과를 일주야(25시간) 조화분해하여 일주조류 및 반일주조류에 관한 조류타원도로 나타낸 것은 Fig. 2와 같다. 그리고 대조기의 조석잔차류 계산결과를 Fig. 3과 같다. 이들 그림에서와 같이 부산항으로 유입된 창조류는 영도를 반시계방향으로 휘감아 돌아 나가며, 부산항 외측에서는 상당한 크기의 조류가 흐르나 조도 및 신선대 부두 전면의 방파제로 인하여 대상해역 부근에서는 약 10 cm/s 크기의 약한 조류가 흐른다. 그리고, 낙조류는 대체적으로 창조류와 반대방향의 흐름 양상을 보인다. 한편, 조석잔차류는 복잡한 지형만큼이나

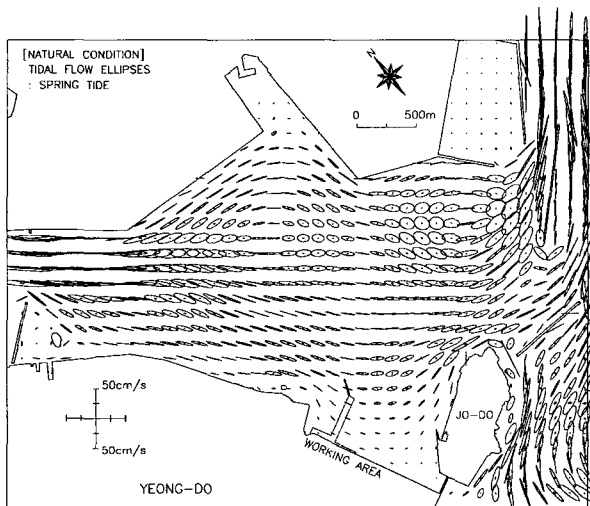


Fig. 2. Tidal current ellipses in spring tide.

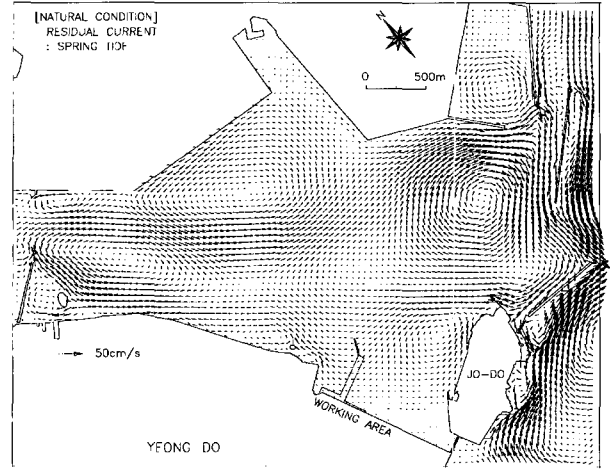


Fig. 3. Residual current in spring tide.

복잡하게 나타난다. 이것은 해안매립, 방파제의 설치 그리고 수로 준설 등과 같은 인위적 해양환경변화에 따른 것으로, 특히 흐름 방향을 가로지른 방파제 부근에서는 강한 외류가 복잡하게 발달하고 있다.

부산항 국제여객 및 해경 부두를 중력식 불투과성 구조형식 및 잔교식의 투과성 구조형식으로 각각 건설한 경우에 대한 최강유속변화를 계산하고 각각의 구조형식에 따른 최강유속의 변화를 공사전의 최강유속과의 상대속도비로 나타낸 것은 Fig. 4와 같다.

그림에서와 같이 최강유속의 변화는 기대되었던 대로 불투과성 구조물 주변에서 크게 나타나고, 투과성 구조물 주변에서는 그 변화가 작게 나타났다. 즉, 상대속도비 $\pm 10\%$ 이상의 변화가 발생한 해역은 불투과성 구조물이 118.1 ha, 투과성 구조물은 6.5 ha로서 그 변화해역이 불투과성 구조물의 변화면적 대비 약 5.5% 정도이다.

Fig. 4와 같은 방법으로 조석잔차류의 변화를 나타낸 것은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 조석잔차류의 변화는 최강유속의 변화양상과 유사하며, 상대속도비 $\pm 10\%$ 이상인 해역은 불투과성 구조물의 경우 194.8 ha, 투과성 구조물은 불과 23.7 ha로서 그 변화해역이 불투과성 구조물의 변화면적 대비 약 12.1% 정도로 계산되었다.

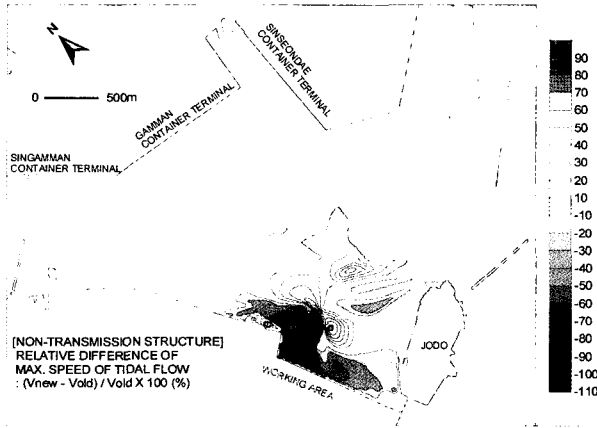
한편, 조위변화에 있어서, 불투과성 및 투과성 구조물 모두, 간만조위에 대하여 $\pm 1\%$ 이상의 변화가 나타나는 해역은 거의 전무하므로, 그 결과의 도시는 생략하였다.

4. 해수교환을 수치실험

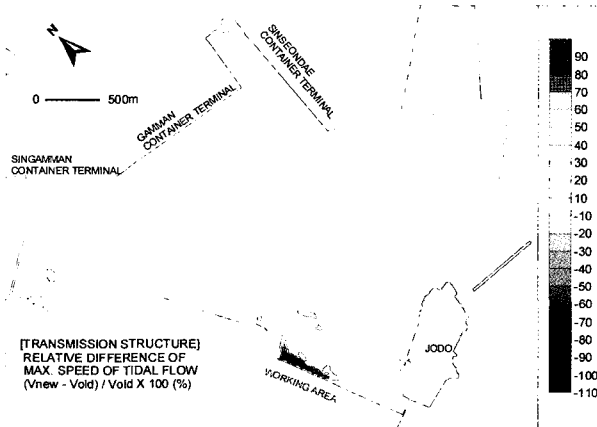
4.1 수치모형의 개요

수심적분된 물질보존방정식은 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial(Hc)}{\partial t} + \frac{\partial(UHc)}{\partial x} + \frac{\partial(VHc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{xy} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (9)$$



(a) Non-transmission structure



(b) Transmission structure

Fig. 4. Maximum speed change rate of tidal current.

여기서, c 는 수심평균된 물질의 농도이다.

그리고 D 는 분산계수에 관한 Tensor로서 식 (10)과 같으며, 윗면이 x 축과 이루는 각도 $\theta = \tan^{-1}(V/U)$ 이면 적절한 축변환한 형태는 식 (11)과 같다.

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_L & 0 \\ 0 & D_T \end{bmatrix} \quad (10)$$

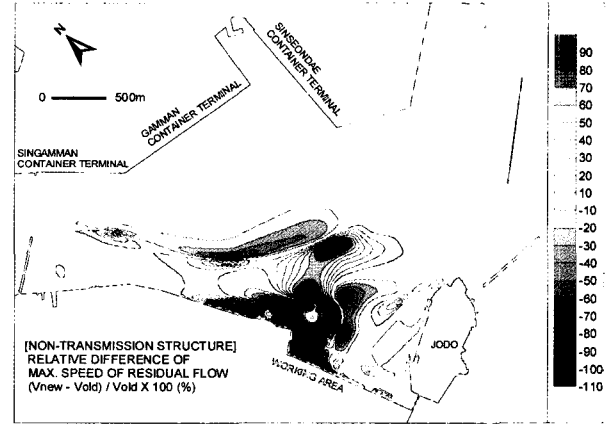
$$D_{xx} = D_L \cos^2 \theta + D_T \sin^2 \theta \quad (11a)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2 \theta + D_T \cos^2 \theta \quad (11b)$$

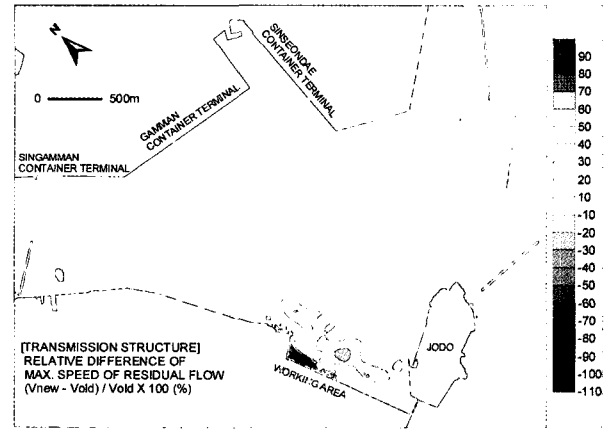
$$D_{xy} = (D_L - D_T) \sin \theta \cos \theta \quad (11c)$$

여기서, D_L 및 D_T 는 각각 이류속도벡터와 평행한 중방향 분산계수 및 직각방향의 횡방향 분산계수로서, 수심적분된 형태의 모형화에서는 D_L 의 경우 흐름 방향의 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 (9)를 재배열하면 식 (12)와 같다(Jozsa[1989]; 이와 김[1995]).



(a) Non-transmission structure



(b) Transmission structure

Fig. 5. Speed change rate of tidal residual current.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(U^*C)}{\partial x} + \frac{\partial(V^*C)}{\partial y} = \frac{\partial^2(D_{xx}C)}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2(D_{xy}C)}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2(D_{yy}C)}{\partial y^2} \quad (12)$$

여기서, 표류속도 벡터 $U^*=(U^*, V^*)$ 는 식 (13)과 같다.

$$U^* = U + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xx}\partial H}{H \partial x} + \frac{D_{xy}\partial H}{H \partial y} \quad (13a)$$

$$V^* = V + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial x} + \frac{D_{xy}\partial H}{H \partial y} + \frac{D_{yy}\partial H}{H \partial x} \quad (13b)$$

만약 C 가 어떤 확률분포함수로서 취급된다면 식 (12)는 Fokker-Planck 방정식(Cushman[1987])과 같다. 식 (13)과 같이 수정된 이류속도성분으로부터 Random-Walk 입자법을 다음과 같이 기술할 수 있다(Jozsa[1989]; 이와 김[1995]). Lagrange적인 취급을 위하여, 연직적으로 균질하게 혼합된 어떤 물질의 질량 M 을 어떤 점에서 순간적으로 방출하는 경우를 고려하고 이 물질은 흐름과 함께 이동한다면, 흐름 속에서 N 개의 입자에 대한 등가질량 $m=M/N$ 을 생각할 수 있으며, 속도장의 Euler 적분을 사용하여 간단히 이들 입자를 추적할 수 있다. 즉, 시간증분 Δt 대하여 주어진 어떤 입자의 새로운 위치 벡터는 식 (14)와 같다.

$$X(t+\Delta t) = X(t) + u(X(t), t)\Delta t \quad (14)$$

여기서, 속도 벡터 u 는 표류속도 U^* 와 불규칙한 분산속도 u' 의 합으로 식 (15)와 같다.

$$u = U^* + u' \quad (15)$$

분산계수가 수심과 전단속도에 비례한다는 Elder[1959]의 개념을 도입하면, 종분산계수 및 횡분산계수는 식 (16)과 같다.

$$D_L \approx 6.0Hu_s \quad (16a)$$

$$D_T \approx 1.5Hu_s \quad (16b)$$

여기서, 식 (16)의 상수 값은 문헌에서 발견된 값의 평균치(Jozsa [1989])이며, 종방향속도 u_L 및 전단속도 u_s 는 식 (17)과 같다.

$$u_L = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (17a)$$

$$u_s = \frac{\sqrt{g}}{C} u_L \quad (17b)$$

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 분산속도성분은 식 (18)과 같다.

$$u'_L = R_1 \sqrt{2D_L/\Delta t} \quad (18a)$$

$$u'_T = R_2 \sqrt{2D_T/\Delta t} \quad (18b)$$

여기서, R_1 과 R_2 는 평균치 0, 표준편차 1인 정규분포를 갖는 난수이고, x 및 y 방향의 불규칙한 분산속도성분은 축변환에 의하여 식 (19)와 같다.

$$u' = u'_L \cos\theta - u'_T \sin\theta \quad (19a)$$

$$v' = u'_L \sin\theta - u'_T \cos\theta \quad (19b)$$

본 모형에서 계산격자는 조석·조류계산에서 사용된 것과 동일한 것을 사용하였으며, 식 (13)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 개경계에 도달하여 계산영역을 Outgoing한 입자는 제거하였다.

한편, 조류는 왕복성 흐름이므로, 만약 해수입자가 선형적인 왕복운동에 의하여 1 조석주기 후 원래의 위치에 되돌아오면 해수교환이 발생하지 않는다. 그러나, 실제 해역에서는 비선형적인 해수운동 및 지형적인 요인에 의하여 조석잔차류가 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]는 실제 해양에서 Buoy를 추적하여 이러한 것은 표현하려고 하였으나 여러 개 Buoy의 동시추적을 현지해양에서 수행하는데 상당한 어려움이 있으므로, Awaji et al.[1980]은 수치실험을 이용하여 즉, 이미 얻어진 흐름장에 여러 개의 표식입자를 투입해 그 궤적을 구하여 그 해역의 해수교환을 이해하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 개념을 도입하여 해수교환율을 식 (20)과 같이 나타내었다.

$$E_V = \frac{V_{OUT}}{V_{TOTAL}} \approx \frac{P_{OUT}}{P_{TOTAL}} \quad (20)$$

여기서, E_V 는 해수교환율, V_{OUT} 는 경계외측으로 수송된 해수체적, V_{TOTAL} 은 경계내측의 초기해수체적, P_{OUT} 는 경계외측으로 수송된 입자수, P_{TOTAL} 은 경계내측의 초기입자수이다.

4.2 결과 및 토의

계산영역이 비교적 작고, 비록 대상해역의 흐름크기가 미약하여 초기에 배치된 입자가 개경계에 도달하는데 많은 시간이 소요되겠지만, 개경계에서 외해로 빠져나가는 입자를 최소화하기 위하여, 본 연구에서 해수교환율은 소조기를 대상으로 검토하였다. 그리고 해수교환의 경우 입자가 투입되는 시점에 따라 해수교환율이 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 입자가 투입되는 시점을 간조 및 만조로 나누어 각각 실시하였다. 또한 투입입자의 초기 위치는 Fig. 6과 같이 해당격자의 중심점에 두었으며, 격자별 수심에 따라 입자의 개수는 깊이 10 cm당 1개씩 입자를 투입하여 총 7588개의 입자를 추적하였다.

불투과성 구조물 및 투과성 구조물의 설치 후 해수교환율을 계산한 결과는 다음과 같다. Fig. 7은 불투과성 구조물에 대한 1 조

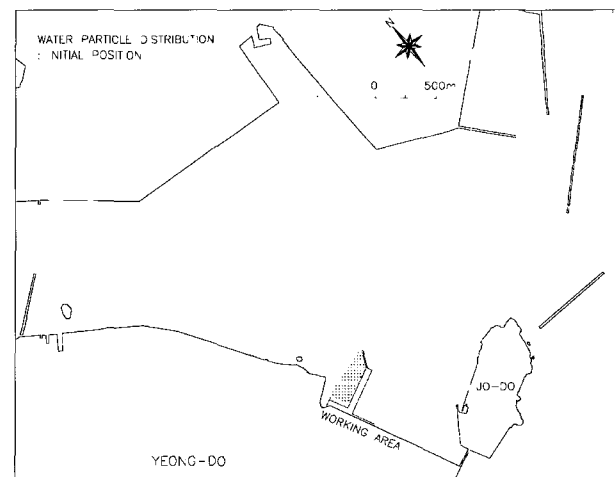
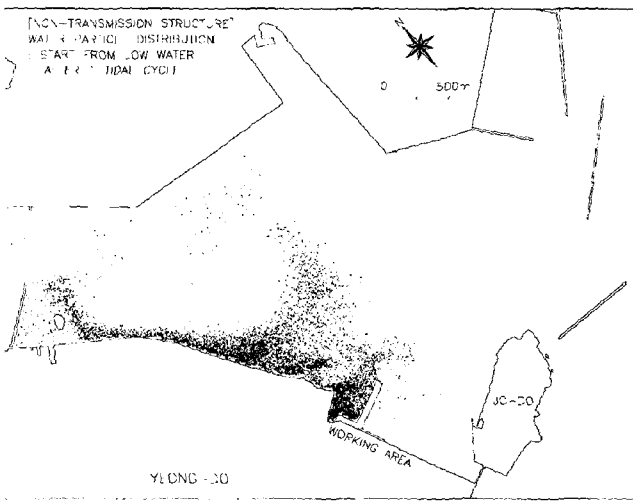
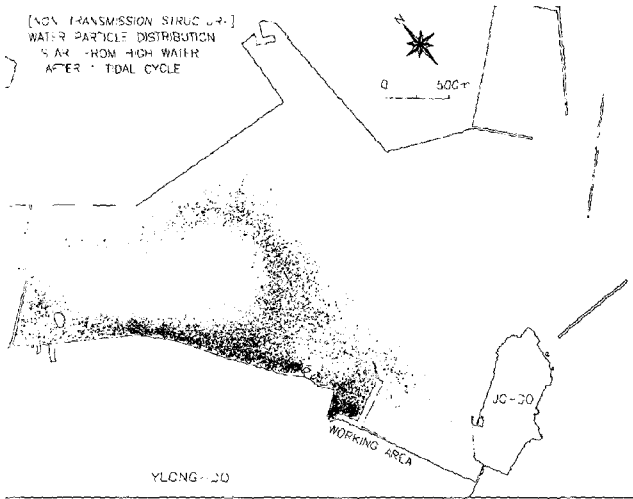


Fig. 6. Initial position of water particles.

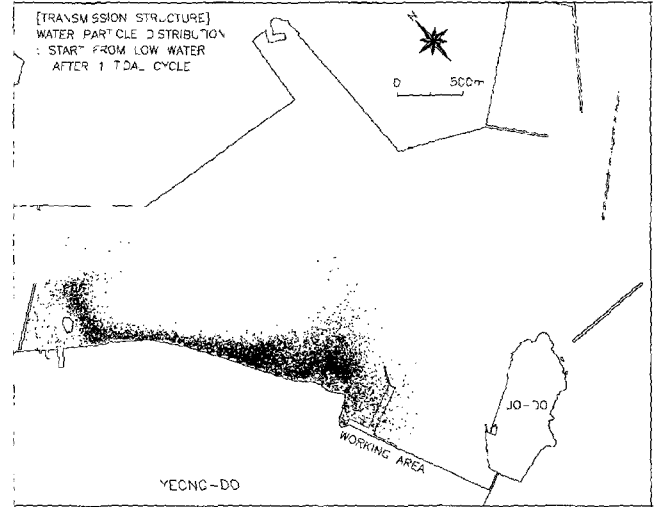


(a) Low Water Release

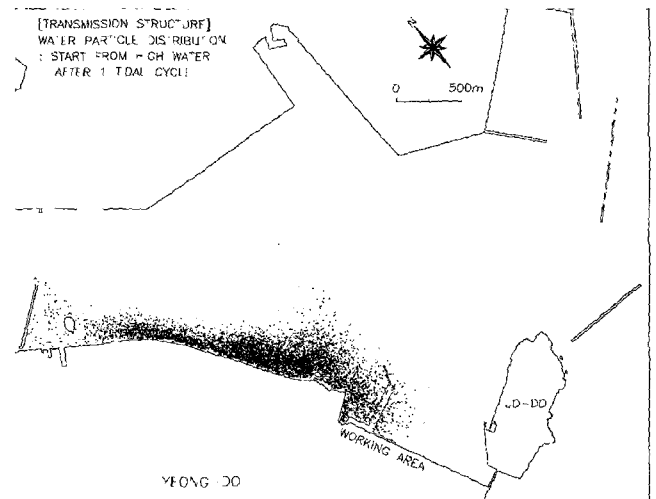


(b) High Water Release

Fig. 7. Water particle distribution after 1 tidal cycle(non-transmission structure).



(a) Low Water Release



(b) High Water Release

Fig. 8. Water particle distribution after 1 tidal cycle(transmission structure).

석주기 후의 입자분포이며, Fig. 8은 투과성 구조물에 대한 결과이다. 이들 그림에서와 같이 시간에 따라 해수입자는 개경계축으로 확산되며, 조석잔차류의 특성(Fig. 3)에 따라 해수의 순이동이 일어나고 있음을 알 수 있다.

이러한 해수교환의 정도를 식 (20)과 같이 정의하여 1 조석주기 동안의 해수교환율을 시계열로 나타낸 것은 Fig. 9과 같다. 이들 그림과 같이 시간의 진행에 따라 전반적으로 해수교환이 증가하고 있으며, 기대되었던 바와 같이 불투과성 구조물에 대한 해수교환율보다 투과성 구조물에 대한 해수교환율이 크게 나타났다. 즉, 불투과성 구조물의 경우 해수교환율은 간조 및 만조 투입시에 대하여 각각 0.49 및 0.54로 계산되었으며, 투과성 구조물의 경우 각각 0.85 및 0.81로 나타나, 투과성 구조물의 경우 불투과성 구조물에 비하여 평균적으로 161.2% 정도의 해수교환의 증가효과가 있음을 알 수 있었다.

5. 요약 및 결론

지금까지 정량적 평가가 어려웠던 투과성 구조물 주변에서 해수유동 특성을 파악하여, 잔교식 항만구조물의 최적설계를 위한 기본적인 자료를 제공하기 위하여, 투과형 구조물에 대한 해수유동 및 해수교환율에 관한 수치모형을 구축하고, 부산항 국제여객 및 해경 부두의 설계에 있어서 본 모형을 적용하고 그 결과를 토의하였다.

항만시설을 불투과성 및 투과성 구조형식으로 각각 건설한 경우에 대한 최강유속의 변화는 불투과성 구조물 주변에서 크게 나타나고, 투과성 구조물 주변에서는 그 변화가 작게 나타났다. 즉, 상대속도비 $\pm 10\%$ 이상의 변화가 발생한 해역은 불투과성 구조물이 118.1 ha, 투과성 구조물은 6.5 ha로서 그 변화역이 불투과성 구조물의 변화면적 대비 약 5.5% 정도이다. 조석잔차류의 변화는 최강유속의 변화양상과 유사하며, 상대속도비 $\pm 10\%$ 이상인 해역

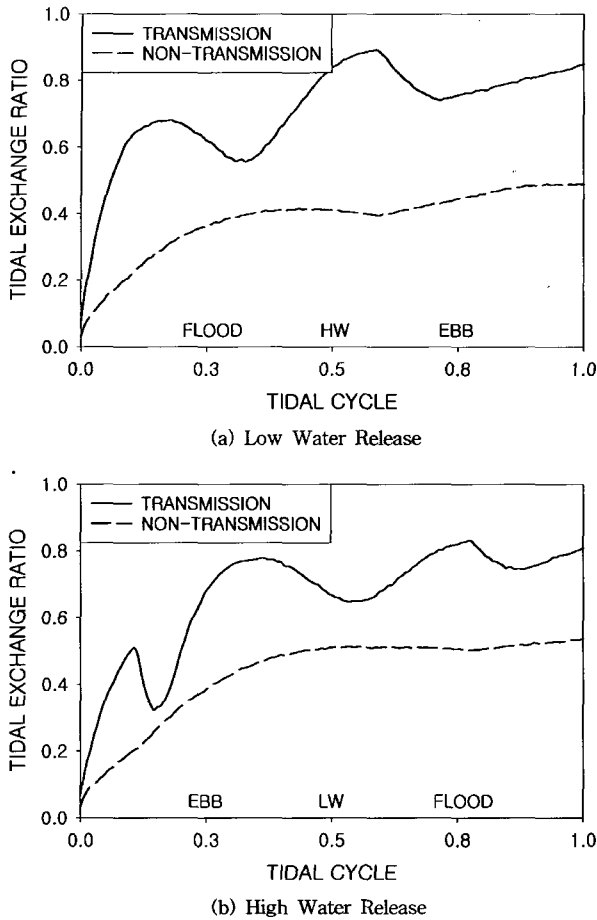


Fig. 9. Tidal exchange ratio.

은 불투과성 구조물의 경우 194.8 ha, 투과성 구조물은 23.7 ha로서 그 변화역이 불투과성 구조물의 변화면적 대비 약 12.1% 정도로 계산되었다. 그리고 조위변화에 있어서, 불투과성 및 투과성 구조물 모두, 간·만조위에 대하여 $\pm 1\%$ 이상의 변화가 나타나는 해역은 거의 전무하였다.

불투과성 구조물의 경우 1 조석주기 후 해수교환율은 간조 및 만조 투입시에 대하여 각각 0.49 및 0.54, 그리고 투과성 구조물의 경우 각각 0.85 및 0.81로 나타나, 투과성 구조물의 경우 불투과성 구조물에 대하여 평균적으로 약 161.2% 정도의 해수교환의 증가효과가 있는 것으로 계산되었다.

참고문헌

[1] 박일흠·이종섭·이문옥, 1998. “저항물체 배후의 이차원 후류에 관한 대격자 수치모형”, 한국해양·해양공학회지, 10(2), 83-92.

- [2] 이종섭, 김호진, 1995. “Random Walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석”, 대한토목학회논문집, 15(5), 1267-1277.
- [3] 이종섭, 박일흠, 1995. “수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수치모형”, 한국수산회지, 28(5), 607-623.
- [4] (주)한국해양과학기술, 2003. 부산항 국제여객 및 해경부두 대안설계 해양조사 보고서.
- [5] Arakawa, C., 1994, *Computational Fluid Dynamics for Engineering*, Univ. of Tokyo Press.
- [6] Awaji, T., Imasato, N. and Kunishi, H. 1980. “Tidal exchange through a strait: A numerical experiment using a simple model basin”, *J. Physical Oceanography*, 10, 1499-1508.
- [7] Cushman, J.H., 1987. “Development of stochastic partial differential equations for subsurface hydrology”, *Stoch. Hydrol. Hydraul.*, Springer-Verlag, 1(4), 241-262.
- [8] Elder, J.W., 1959. “The dispersion of market fluid in turbulence shear flow”, *J. Fluid Mech.*, 5, Part 4, 544-560.
- [9] Falconer, R.A., 1991. “Review of modelling flow and pollutant transport processes in hydraulic basins”. *Proc. 1st Int. Conf. on Water Pollution: Modelling, Measuring and Prediction*, Southampton, Computational Mechanics Publications, Sep., 323.
- [10] Falconer, R.A., 1994. “An introduction to nearly-horizontal flows”, *Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book*, Edited by M.B. Abbott and W.A. Price, E & FN SPON, 2736.
- [11] Falconer, R.A. and Owens, P.H., 1987. “Numerical simulation of flooding and drying and wind stress effects in a two-dimensional tidal numerical model”, *Proc. Inst. of Civil Eng.*, 83, Part 2, Mar., 161-180.
- [12] 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 Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, Univ. of Bradford, Bradford, Sep., Paper No.30, 332-340.
- [13] Munson, B.R., Young, D.F. and Okishi, T.H., 1994. *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- [14] Parker, D.S., Norris, D.P. and Nelson, A.W. 1972. “Tidal exchange at Golden Gate”. *Proc. of ASCE*, 98, SA2, 305-323.
- [15] Schlichting, H., 1979. *Boundary Layer Theory*, 7th Ed., McGraw-Hill, New York (translated by J. Kestin).
- [16] Zannetti, P. and Al-Madani, N., 1983. “Simulation of transformation, buoyancy and removal processes by Lagrangian particle method”, *Proc. 14th NATO/CCMS ITM*, Copenhagen, Denmark, 733-744.
- [17] 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, 7-24.

2004년 3월 10일 원고접수

2004년 3월 19일 수정본 채택