

다양한 벽 경계조건을 이용한 정사각형 항구의 흐름구조 예측

강 윤 호*
(99년 6월 30일 접수)

Flow Structure Prediction for a Square Harbour using Various Wall Boundary Conditions

Yun Ho Kang*

Key Words : Square Harbour(정사각형 항구), Wall Boundary Condition(벽경계조건), Eddy(와류)

Abstract

A model harbour with plan scale of 1.08×1.08m is built on a tidal tank using a Froude relationship from a real harbour(432×432m). Velocity components are measured by a ultrasonic velocity meter and flow structure is then predicted using a 2-D depth integrated hydrodynamic model. In the finite difference model implemented in this study, various wall boundary conditions, i.e. no-slip, free-slip, partial-slip and semi-slip are used to represent turbulent diffusion terms, e.g. $\partial^2 U_{ij}/\partial x^2$ or $\partial^2 U_{ij}/\partial y^2$. These conditions are focused to investigate their influence on the flow structure along the wall and basin of the harbour with aspect ratio of unity, i.e. Length/Breadth. Numerical experiments are compared with the measurements and used to analyse flow patterns in the basin during tidal cycles. It is shown from the results that no-slip closed boundary condition is the most appropriate method with respect to the location of the eddy centre, although the condition underestimates velocity components along the wall.

1. 서 론

소형선박의 정박이나 대피에 사용되는 마리나와 항구를 설계하기 위해서는 파도 등 외력에 대해 안전조건이 가장 중요하다. 그리고 항만의 수

질과 퇴적물과 관계하여 항만의 유속구조, 물질교환, 퇴적물유입량 그리고 체류시간 등이 고려되어야 한다. 이러한 후자의 목적을 위하여 이상화된 직각형의 수조항구에서 조석구조와 물질교환 특성에 대한 연구가 수행되었다¹⁻³⁾. 초기연구에서는 수조실험과 수치실험간의 불일치가 발견되었

* 여수대학교, 여수지역환경기술개발센터

는데 그 원인은 주로 비선형 이송항을 단순한 유한 차분식을 사용하여 취급하거나 단순 난류모델을 사용하는데 있었다²⁾. 수조실험에서도 문제점이 발견되었는데, 그것은 주로 프루드 모델을 사용함으로써 발생하였다. 자유 지표수 흐름에 대한 모형실험시 일반적으로 프루드상사칙을 사용하는데, 원형과 모형의 프루드수를 같게 한 경우, 모델의 레이놀즈수는 원형의 값에 비해 작아진다⁴⁾. 왜곡된 모형의 경우 이러한 차이는 더욱 커지기 때문에 실험 결과에 주의하여야 한다.

본 연구에서는 항구내의 흐름구조를 예측하는데 있어서 벽 경계를 취급하는 방법 따라, 다양한 결과가 발생할 수 있다는 점에 주목하고서, 변장비 (aspect ratio, 즉, 길이/폭)가 1인 경우에 한정하여 연구하였다. 가장 먼저, 수치모델의 결과를 보정하기 위해, 정사각형의 수조항구에서 초음파유속계를 사용하여 유속을 측정하였다.

흐름구조는 수심적분 이차원 수리역학모델을 사용하여 계산하고 해석하였다. 유속분포 예측시, 벽 경계에 인접한 위치에서 난류확산항, 즉 $\partial^2 U_{ij} / \partial x^2$ 혹은 $\partial^2 U_{ij} / \partial y^2$ 을 처리하는 방법에 따른 유속분포를 비교하여 보았다. 수심평균와류확산계수는 혼합거리모델을 사용하였고, 대수함수 유속단면을 가정하고서 관측값에 근거하여 추론된 Fischer의 식⁵⁾을 사용하였다. 벽 경계는 다음 4가지 방법, 즉 비활 (no-slip), 자유활 (free-slip), 부분활 (partial-slip) 그리고 의사활 (semi-slip) 폐쇄경계조건을 사용하였다.

2. 수조 실험

실험실의 항구수조는 미국 워싱턴의 Puget Sound에 있는 실제 항구를 참고하여 만들었다. 원형항구는 정사각형이며, 가로 세로의 거리는 각기 432m이고, 면적은 18.7ha이다 (Fig. 1). 항구입구는 비대칭적으로 위치하며 크기는 48m이며, 바닥의 평균수심은 6m이다. 프루드의 상사법칙을 이용하여 원형 항구를 실험실의 수조에서 작은 규모로 재현하였다 (Fig. 2). 이때, 수평과 수직척도는 각기 1:400과 1:40 이어서 왜곡비 (distortion ratio)는 10:1이다. 조석탱크 안에 항구를 설치하였으며, 조석탱크의 크기는 가로 세로가 5.3m × 3.8m이며 수심은

0.6m이다. 항구의 크기는 1.08m × 1.08m, 항구입구는 0.12m, 평균수심은 0.15m이다. 수조의 재질은 수평바닥과 벽면이 모두 플라스틱이며 흰색 페인트로 칠하였다 (Fig. 2의 P, Q, R 과 S 참고). Fig. 2에서 P벽은 나무이며, Q와 R벽은 이동이 가능하도록 하였고 투명한 재질을 사용하였다. S벽은 반투명의 재질로 만들었다. 원형 항구의 조차는 4m이고 조석주기가 12.42 시간이므로 원형항구와 수조항구의 동력학적 상사를 얻기 위해 프루드법칙과 왜곡비를 이용하여 계산하면, 수조 항구의 조차는 0.1m이며 조석주기는 708s이 된다. 조석은 두 가지 주요 부품 (웨어와 computer - IBM HP-85)으로 구성된 조석발생기에 의해 만들어진다. 컴퓨터는 데이터 수집기와 중앙처리장치에 연결하였는데, 직류모터를 통하여 나사재를 제어하여 웨어를 사인함수와 같은 방식으로 수직운동을 하게한다. 조위는 수심기록기를 사용하여 계측한다. 균일한 속도로 유량을 주어 조석탱크로 유입하며, 다공질의 필터물질을 다지관에 부착하여 국부적 난동을 최소화하였다.

유속성분의 계측기구로는 초음파속도계를 사용하였다. 탐침과 데이터수집기 그리고 모니터가 한 세트로 구성되어 있다. 탐침에는 전부 6개의 감지기와 2개의 반사기가 부착되어 있고, 감지기를 통과하는 유속의 순간값을 측정한다. 탐침은 개인용 컴퓨터에 연결되어 매초 10회의 순간값을 기록한다. 3방향의 Cartesian좌표에서 유속성분을 제공한다. 정밀도는 ±1mm/s 이다. 측정된 기록은 시간에 대한 평균값으로 환산하여 수치모델결과와 비교한다.

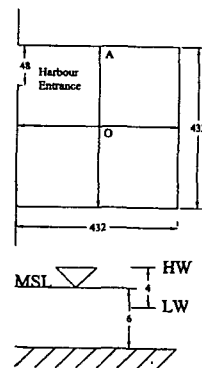


Fig. 1 Prototype harbour dimensions (unit : meter)

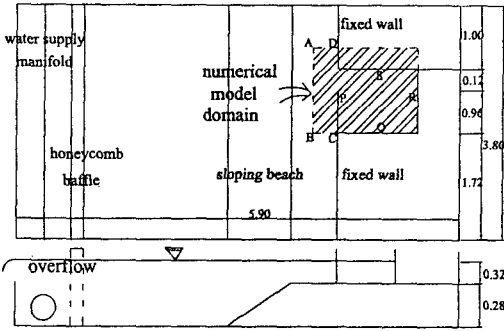


Fig. 2 Schematic illustration of laboratory tidal basin and harbour configuration(unit-meter ; dotted line box-computation domain)

3 수치모델실험

3.1 지배방정식

수리역학 모델의 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes Equation을 수심에 대하여 적분한 것이며, 조위값과 수심평균 유속장을 계산한다⁶⁾. 연직가속도는 중력가속도에 비해 매우 작기 때문에 무시하며, 수직면에서 레이놀즈응력은 Boussinesq 근사법에 의해 표현하였다⁷⁾. 수심적분 연속방정식과 x-와 y-방향에서 운동량방정식은 각기 다음과 같다:-

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta U^2 H) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta UVH) = \\ \nu VH - gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} + \bar{\epsilon} H \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta V^2 H) = \\ -\nu UH - gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} + \bar{\epsilon} H \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서 t 는 시간; H 는 전수심 ($\zeta + h$, ζ =해면변위, h =수심); U 와 V 는 x -와 y -방향의 수심평균

유속성분; β 는 운동량 보정계수($=1.016$)⁸⁾; ν 는 코리올리계수($=\omega \sin \phi$, ω 는 지구자전 그리고 ϕ 는 위도); g 는 중력가속도; $\bar{\epsilon}$ 는 수심평균 와점성계수이다.

바다마찰이 전 수층에서 발생하는 난류의 주요 인이라 가정하였을 때, 연직단면의 유속분포는 대수형태라고 가정할 수 있으므로 수심평균 난류확산계수는 다음과 같이 계산될 수 있다^{5,9)}:-

$$\bar{\epsilon} = 0.15 U_* H \quad (4)$$

위 식에서 $U_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$, τ_w 는 전단력이다. 수치확산 즉 인위적인 와점성(artificial eddy viscosity)을 감소시키기 위해, 운동량방정식에서 이송항들은 3차의 upwind차분법을 사용하여 보간되었다⁷⁾. 수두손실은 Colebrook-White식을 사용하여 계산하였다:-

$$C = -\sqrt{32g} \log_{10} \left[\frac{k_s}{14.84H} + \frac{1.255C}{(4U_* H / \nu) \sqrt{2g}} \right] \quad (5)$$

위식에서 U_s 는 수심평균 유속; 그리고 $\nu = \mu / \rho$, ρ 는 유체의 밀도, μ 는 점성계수; k_s 는 Nikuradse 등사립조도계수 (equivalent sand grain roughness; $=0.2\text{mm}$)이며 연흔이나 사주와 같은 바닥의 특성을 더욱 자세히 표현할 수 있다⁸⁾.

수치모델은 저조에서 시작하도록 하여 수조실험과 일치하도록 하였다. 계산시간을 최소화 하기 위해 Fig. 2에서 점선으로 표시된 사각형 ($1.72\text{m} \times 1.72\text{m}$)을 계산영역으로 사용하였다. 정사각형의 격자는 x 와 y 방향에서 동일하게 0.04m 이며, 따라서 계산영역은 43×43 격자의 구조를 갖게 된다. 개방경계조건을 위해, 항구입구에 평행한 면(AB)을 따라서 조위를 주었고, 연직방향(BC와 AD)에서는 속도성분 0m/s 을 주었다(Fig. 2). 연직방향의 경계 조건은 자유선경계로서 취급된다. 3번의 조석주기동안 수리역학적 흐름장을 계산하였다. 시간스텝은 0.2s 이며, 평균수심 0.15m 에 따른 Courant number는 8이 되도록 하였다.

3.2 폐쇄경계조건

유한차분모델에서 폐쇄경계를 표현하는 방법에 따른 유속장의 영향을 조사하기 위해 몇 가지 종류의 폐쇄경계 표현이 고려되었고, 벽경계에 가까운 위치에서 난류확산항 (즉, 식 (2)와 (3)에서 오른쪽 마지막 항)에 대한 이차도함수가 측정되었다. Fig. 3을 참고하였을 때, x방향 유속 U 의 y 방향에 대한 이차도함수가 $i+1/2, j$ 지점에서 필요하며, 이때 $i+1/2, j-1$ 지점에서 유속 U 는 계산영역 바깥 가상 지점의 값이다. 가상지점의 유속을 처리하는 일반적인 방법은 계산영역의 하부경계에서는 전진차분을, 상부경계에서는 후진차분을 사용하는 것이다. 그러나, 이러한 방법은 특히 사행흐름에서 이차류를 계산할 때 물리적으로 비현실적인 수위경사가 계산되는 것이 발견되었다¹⁰⁾. 따라서 이러한 유속을 이차도함수로 표현하는데, 아래와 같이 4가지 방법, 즉, 비활, 자유활, 부분활 그리고 의사활 경계 조건을 사용할 수 있다.

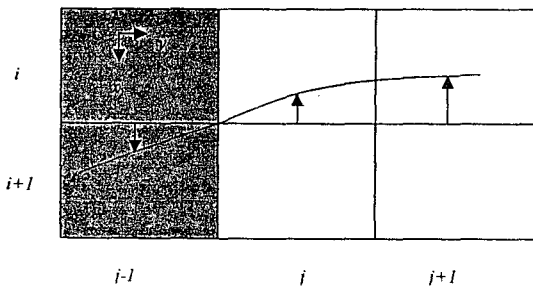


Fig. 3 Finite difference notation for closed boundary representation

3.2.1 비활조건

폐쇄경계에 일반적으로 사용되는 조건은 비활조건이다. 이 조건은 다음과 같은 가정에 근거한다: 유체는 점성에 의해 벽에 달라붙는다. 이 경우 수치모델의 두개의 격자에서 유속은 선형변화를 보인다고 가정된다. 따라서 폐쇄경계에서 유속은 0m/s를 갖는다. 이 조건은 다음과 같이 표현된다:-

$$U_{i+1/2, j-1} = -U_{i+1/2, j} \quad (6)$$

그러나 수치모델에 사용된 격자의 크기가 유한하기 때문에, 비활경계조건은 벽으로부터 유체로 실제보다 훨씬 큰 전단력을 주게 된다. 이러한 사실은 흐름속도를 작게 계산하는 결과를 초래한다¹¹⁾.

3.2.2 자유활조건

널리 쓰이는 또 다른 폐쇄 경계조건으로는 자유활조건이 있다. 이는 비활조건과는 달리, 유체가 벽을 따라 미끄러져 간다고 가정한다. 이 경우, 벽과의 전단력은 무시할 만큼 작다고 가정되기 때문에, 수치모델의 두개의 격자에서 유속의 변화는 없다고 가정된다. 이 조건은 다음과 같이 표현된다:-

$$U_{i+1/2, j-1} = U_{i+1/2, j} \quad (7)$$

자유활조건은 벽 경계 가까이에 서 실제보다 큰 유속이 항상 계산된다.

3.2.3 의사활조건

벽에서 전단력은 이차마찰법칙에 의해 표현될 수 있다⁽¹¹⁾ :-

$$\tau_w = \frac{\rho g}{C^2} U^2 \quad (8)$$

벽에서 전단력은 Newton의 점성법칙에 의해 표현될 수 있다고 가정하면:-

$$\tau_w = \rho \epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \quad (9)$$

식 (4)를 참고하고, 식 (8)과 (9)를 같다고 하면, 유속의 연직구배는 다음과 같이 구해진다:-

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\sqrt{g}}{C} \frac{U}{\partial H} \quad (10)$$

위식에서 σ 는 상수(식4에서 $\sigma=0.15$)이다. 하부경계에서는 후진차분 그리고 상부경계에서는 전진차분을 사용하면:-

$$U_{i+1/2,j-1} = U_{i+1/2,j} \left[1 - \frac{\sqrt{g\Delta y}}{C\sigma H} \right] \quad (11)$$

위식에서 Δy 는 벽에 연직한 격자의 크기이고 식의 오른 편 괄호의 값은 약 0.95이다¹¹⁾. 마찬가지로, 동일한 표현이 이차도함수에서도 적용될 수 있다.

3.2.4 부분활

가상의 지점에서 유속이 실제지점에서의 유속값의 배수가 된다고 가정한다면, 다음과 같은 식을 얻게 된다:-

$$U_{i+1/2,j-1} = \alpha U_{i+1/2,j} \quad (12)$$

위식에서 α =가중계수. 이 경우에 벽과 $j+n$ 에서 자유흐름 유속사이에서 유속구조는 7승법칙의 분포를 따른다고 가정한다¹²⁾ :-

$$U(y) = U_{i+1/2,j+n} \left[\frac{y}{(n+1/2)\Delta y} \right]^{1/7} \quad (13)$$

식(13)을 y 에 대해서 미분하면, 다음 식을 얻는다:-

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{7} U_n \left[\frac{1}{(n+1/2)\Delta y} \right] \left[\frac{y}{(n+1/2)\Delta y} \right]^{-6/7} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{7} U_n \left[\frac{1}{(n+1/2)\Delta y} \right] \left[\frac{U}{U_n} \right] \left[\frac{y}{(n+1/2)\Delta y} \right]^{-1} \\ &= \frac{U}{7y} \quad (15) \end{aligned}$$

따라서 벽 경계에서 마찰효과가 지배적인 임의의 격자 점에서 이차도함수를 구하는데 효과적인 근사값이 된다 만일, 예를 들어 $\frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2}$ 근사값을 구하기 위해 가상지점 (fictitious point) 방법을 사용한다면, 식 (15)와 같게 되기 위해서 가중치는 다음과 같다:-

$$\frac{U_{i+1/2,j} - \alpha_1 U_{i+1/2,j}}{\Delta y} = \frac{U_{i+1/2,j}}{7(\Delta y/2)} \quad (16)$$

위식에서 $\alpha_1 = 5/7 = 0.714$ 가 제시되었다. 이 값은 비활조건에서 $\alpha_1 = -1$ 인 경우와 대조적으로 비교된다. 이러한 방법을 이차도함수에 확장하면, 식 (14)을 y 에 대해 미분하면 다음과 같다:-

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -\frac{6}{49} U_n \left[\frac{1}{(n+1/2)\Delta y} \right]^2 \left[\frac{y}{(n+1/2)\Delta y} \right]^{-13/7} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} &= -\frac{6}{49} U_n \left[\frac{1}{(n+1/2)\Delta y} \right]^2 \left[\frac{U}{U_n} \right] \left[\frac{y}{(n+1/2)\Delta y} \right]^2 \\ &= -\frac{6U}{49y^2} \quad (18) \end{aligned}$$

$\frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2}$ 의 근사값을 구하기 위해 가상지점방법을 이용하여 식 (18)과 같게 하기 위해선, 다음 식(19)를 필요로 한다.

$$\frac{U_{i+1/2,i+1} - 2U_{i+1/2,j} + \alpha U_{i+1/2,j}}{\Delta y^2} = -\frac{24U_{i+1/2,j}}{49(\Delta y)^2} \quad (19)$$

α 를 찾기 위해 식(19)를 풀려면, $U_{i+1/2,j+1}$ 과 $U_{i+1/2,j}$ 사이에서 함수관계를 가정하는 것이 필요하다. 식(13)을 이용하면 다음 관계가 발견된다:-

$$U_{i+1/2,j+1} = 3^{1/7} U_{i+1/2,j} \quad (20)$$

그리고 식 (19)에 대입하면 다음을 얻는다:-

$$\alpha = -\frac{24}{49} + 2 - 3^{1/7} \approx 0.340 \quad (21)$$

4 결과 및 토의

변장비가 1인 수조항구에 대한 유속 관측값과 다양한 폐쇄경계조건을 이용한 수치모델의 결과를 이용하여 항구내의 흐름구조를 해석하였고, 폐쇄경계를 취급하는 방법에 따른 예측 값 결과를 비교하였다.

4.1 흐름구조

창조시 자유흐름은 항구입구에 직각방향으로 들어오면서 항구 벽에 부딪혀 굴절되거나, 일부는 입구를 통하여 항구 안으로 유입된다. 유입되는 흐름은 항구의 기하학적 모형 때문에 제트형태의 흐름이 된다. 좁은 항구입구를 통과한 뒤 계속 전진하다가 입구의 반대쪽 벽에서 압력경사 때문에 방향을 바꾸어 흐르면서 각운동량을 잃는다. 한편 이러한 와류는 고조에 이를 때까지 계속된다. 고조가 지난 후, 항구바깥의 흐름은 방향을 바꾸어 저조까지 계속된다. 그러나 항구내의 흐름은 순환방향을 바꾸지 않고 낙조 시에도 계속 유지된다. 최대유속은 고조시 발견되었다 (Fig. 4 의 b). 시계방향의 흐름구조는 주로 2가지 원인에 기인하는 것으로 사료된다. 첫째, 항구로 유입되는 흐름은 좁은 입구를 지나면서 제트류가 된 후 항구분지를 순환하게 된다. 이러한 제트 운동량은 폐쇄된 분지 내에 한정되며, 오로지 벽과 바닥의 마찰에 의해서만 소실된다. 제트류는 조석주기동안 강한 와류를 계속적으로 유지하였다. 낙조시 유출되는 흐름은 마찬가지로 항구입구 부근에서 제트류가 된다 (Fig. 4의 c 와 d). 와류의 크기는 낙조시가 창조시 보다 작다. 왜냐하면, 유입되는 제트류 운동량이 부재하기 때문이다. 둘째, 항구내의 흐름방향은 주로 항구입구의 위치에 기인한다. 만일 입구가 오른 편에 위치

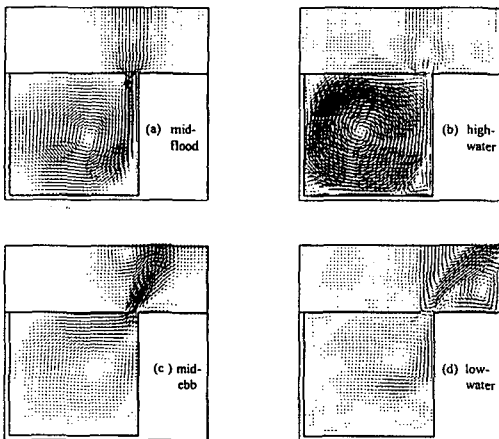


Fig. 4 Predicted velocity field for one tidal cycle using no-slip closed boundary condition

한다면, 순환은 시계방향이 되고, 왼편이라면, 반시계 방향을 갖게 된다. 관측되고 예측된 유속분포를 고려하였을 때, 순환은 항구 내에서 주요 흐름구조로서 인식된다. 모든 테스트결과, 변장비 1의 항구에서는 오직 1개의 큰 와류가 중앙에 형성되었고, 소규모의 와류는 항구의 구석에서만 발견되었고, 와류의 수는 낙조시 증가하였다.

4.2 경계조건비교

예측값을 Fig. 1의 단면 OA 에서 비교하였다 (Fig. 5). 항구입구에서 분지를 보았을 때, 비활조건이 다른 경계조건에 비해 가장 낮은 유속값을 예측하였다. 벽 가까이에서 유속크기는 다음 순서로 계산되었다, 즉 자유활, 부분활, 의사활 그리고 비활경계조건. 이중 처음 3가지 조건의 결과는 서로 잘 일치하였다.

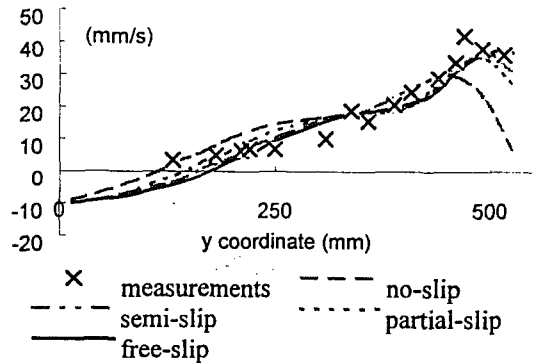


Fig. 5 Comparison of laboratory measurements and hydrodynamic predictions using different closed boundary conditions along the cross-section OA in Fig. 1

의사활과 부분활조건에 의한 흐름구조는 각 조석상에서 거의 유사하게 나타났다. 저조시 비활조건 (Fig. 4의 b)은 부분활이나 의사활조건(Fig. 6의 b와 c)에 비해, 와류의 중앙이 항구입구에 더욱 가까이 위치하는 것으로 예측하였다. 이 결과는 육안으로 관측된 흐름장과 가장 유사하였고, 열료실험¹⁴⁾에서 찻잔효과(cup-of-tea effect)에 의해 와류의 중앙에 높은 농도가 발견된 것을 고려할 때 가장

적합한 조건이라 판명되었다. 자유활조건(Fig. 6의 c)으로는 다른 모든 조건들에 비해 와류가 상이한 위치에 형성되는 것으로 예측하였다.

Hakimzadeh¹³⁾의 연구에 따르면 변장비가 4.0 그리고 0.25인 경우에 폐쇄경계조건이 흐름구조에 지대한 영향을 미치기 때문에, 항구 내에서 생성되는 와류의 수가 폐쇄경계조건에 따라 증가 혹은 감소 될 수 있다고 보고하였다. 그의 연구에서는 부분활조건이 가장 적합한 것으로 판명되었다. 그러나 변장비=1을 사용한 본 연구에서는, 벽 경계조건이 흐름장에 영향을 미치나 그 정도가 매우 미약한 것으로 판명되었다. 여기에 대한 이유는 다음과 같다고 사료된다. 압력경사와 벽 경계의 전단력의 상호작용은 정사각형 항구에서는 오직 1개의 와류를 형성한다. 반면에 변장비가 크거나 작은 경우, 벽면의 전단력은 흐름구조에 더욱 뚜렷한 효과를 미친다. 따라서 벽면의 전단력을 표현하는 방법에 따라 매우 다른 결과가 예측될 수 있다.

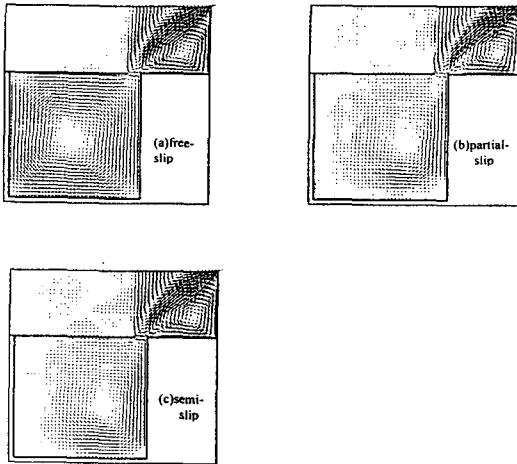


Fig. 6 Predicted velocity fields for low tide using various closed boundary conditions

5. 결론

본 연구에서는 중조차 환경의 마리나를 수리실험실의 조석탱크에서 재현하였고, 유속을 측정하였다. 다양한 벽 경계조건 (비활, 자유활, 부분활 그리고 의사활)에 따른 다양한 유속장 변화 예측값

을 관측값과 비교하였고, 다음과 같이 요약할 수 있다:-

- 1) 벽 근처에서 부분활 그리고 의사활조건은 실측값에 비해서는 작으나 서로 비슷한 유속값을 예측하였고, 자유활조건은 실측값에 비해 크게, 비활조건은 작게 예측하였다.
- 2) 항구의 중앙에 형성되는 와류의 위치를 비교한 결과, 비활조건이 가장 적합한 것으로 판명되었다. 반면에 자유활조건에서는 와류의 중앙이 다른 세가지 조건의 결과에 비해 항구분지에서 항구 바깥을 보았을 때, 원편으로 치우친 것으로 발견되었다.
- 3) 변장비가 0.4이거나 4인 경우, 벽 경계를 취급하는 방법에 따라 항구 내에 생성되는 주요 와류의 수가 증가하거나 감소하는 것을 고려하였을 때, 변장비가 1인 정사각형 항구에서는 벽 경계가 와류의 생성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 조사되었다.

감 사

본 연구에 재정적 도움을 준 교육부와 영국 Bradford대학에 감사 드린다. 저자는 지도교수인 Professor Roger A Falconer에게도 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 1) 서용권, 문종춘, 강종대, "조석효과에 의한 항구모델 주위의 유동 및 물질전달에 관한 실험적 연구", 한국해양 공학회지, 제10권, 제1호, pp.100-107, 1996
- 2) Nece, R.E. and Falconer, R.A., "Modelling of tide induced depth averaged velocity distribution in a square harbour", Proceedings of the International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters, Bradford, UK, Gower Technical Press, pp.56-66, 1989
- 3) Falconer, R.A. and Yu G., "Effects of Depth,

- Bed Slope and Scaling on Tidal Currents and Exchange in a Laboratory Model Harbour", Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2,89, Sept., 561-576, 1991
- 4) Falconer, R.A., "Residual Currents in Port Talbot Harbour: a Mathematical Model Study", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 79, pp.33-53, 1985
 - 5) Fischer, H.B., "Longitudinal Dispersion and Turbulent Mixing in Open Channel Flow", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 5, pp.59-78, 1973
 - 6) Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill Book Co., New York, 6th edit., pp.742, 1979
 - 7) Rodi, W., "Turbulence Models and Their Application in Hydraulics", International Association for Hydraulics Research, Delft, 2nd edit., pp.104, 1984
 - 8) Falconer, R.A., "DIVAST Numerical Model Details", Internal Report, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Bradford, Bradford, UK, 1994
 - 9) Elder, J.W., "The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow.", J.Fluid Mech., Vol. 5, pp.544-560, 1959
 - 10) Kuipers, J. and Vreugdenhil, C.B., "Calculation of Two-Dimensional Horizontal Flow", Delft Hydraulics Laboratory Technical Report, S163, Part 1, pp.1-44, 1973
 - 11) Li, C.W. and Falconer, R.A., "Depth Integrated Modelling of Tide Induced Circulation in a Square Harbour", Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 3, pp.321-332, 1995
 - 12) Alstead, R.D., "Numerical Modelling of Tidal Flow Using Nested and Patched Grid Schemes", PhD Thesis, University of Bradford, Bradford, UK, 1994
 - 13) Hakimzadeh, H., "Turbulence Modelling of Tidal Currents in Rectangular Harbours", Ph.D. Thesis, University of Bradford, England, pp.336, 1997
 - 14) Kang, Y.H., "Eulerian and Lagrangian Approaches to Simulating Solute Transport in a Rectangular Harbour", PhD Thesis, University of Bradford, Bradford, UK, pp.350, 1998