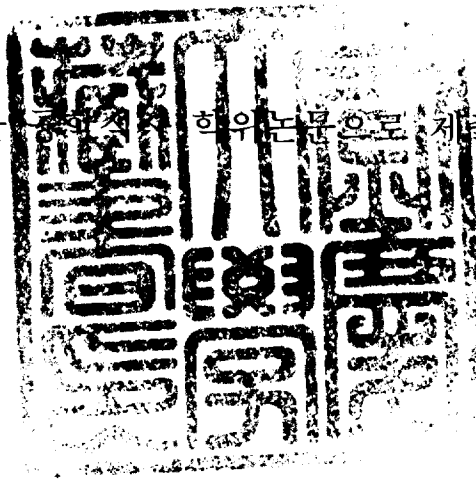


공학석사 학위논문

파일식 구조물에 대한
수리학적 수치시물레이션

지도교수 이 종 섭

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2005년 2월




부경대학교 산업대학원

토목공학과

배성근

배 성 근의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월 18일

주	심	농공학박사	이	영	대	
위	원	공학박사	이	상	호	
위	원	공학박사	이	종	섭	

목 차

List of Figures	vi
List of Tables	ix
List of Symbols	x
Abstract	xii
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구의 방법 및 기대효과	1
2. 수치모형의 개요	3
2.1 DIVAST 모형의 개요	3
2.2 저항물체의 항력을 고려한 기본방정식의 수정	8
3. 해수유동 수치시뮬레이션	10
3.1 대상해역의 개요	10
3.2 현상태의 해수유동 수치시뮬레이션	10
3.2.1 계산영역 및 수심도	10
3.2.2 계산조건	13
3.2.3 모델검증	14
3.2.4 해수유동 시뮬레이션 결과	26
3.3 중력식 구조물 설치시 해수유동 수치시뮬레이션	31
3.3.1 계산조건	31
3.3.2 해수유동시뮬레이션 결과	34
3.4 파일식 구조물 설치시 해수유동수치시뮬레이션	39
3.4.1. 항력계수의 평가방법	39

3.4.2 수치계산조건	46
3.4.3 해수유동시물레이션 결과	46
4. 중력식 구조물과 파일식 구조물 설치에 따른 수리현상 변화	51
4.1 해수유동 변화량	51
4.1.1 중력식 구조물 설치시 대조기 유속변화량	51
4.1.2 파일식 구조물 설치시 대조기 유속변화량	54
4.2 해수교환율 및 해수소통량 예측	57
4.2.1 해수교환율 예측	57
4.2.2 해수소통량 예측	74
5. 요약 및 결론	78
참고문헌	80
감사의글	82

List of Figures

Fig. 2.1 Flow chart of the DIVAST model.	7
Fig. 3.1 Computational grid system.	11
Fig. 3.2 Contour map of water depth below datum level.	12
Fig. 3.3 Position of model verification point.	15
Fig. 3.4 Comparisons between observed and computed at the tide observation station.	16
Fig. 3.5 The result of tidal current observation in the station C1, C2.	18
Fig. 3.6 The result of tidal current observation in the station SC1.	19
Fig. 3.7 The result of tidal current observation in the station SC2, SC3.	20
Fig. 3.8 Computed tidal current in the station C1.	21
Fig. 3.9 Computed tidal current in the station C2.	22
Fig. 3.10 Computed tidal current in the station SC1.	23
Fig. 3.11 Computed tidal current in the station SC2.	24
Fig. 3.12 Computed tidal current in the station SC3.	25
Fig. 3.13 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max.).	27
Fig. 3.14 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Ebb max.).	28
Fig. 3.15 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Flood max., detail region).	29
Fig. 3.16 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Ebb max., detail region).	30

Fig. 3.17 Design of structure position.	31
Fig. 3.18 Computational grid system that of gravity type structures.	32
Fig. 3.19 Contour map of water depth below datum level that of gravity type structures.	33
Fig. 3.20 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., gravity type structures).	35
Fig. 3.21 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (ebb max., gravity type structures).	36
Fig. 3.22 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., detail region, gravity type structures).	37
Fig. 3.23 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Ebb max., detail region, gravity type structures).	38
Fig. 3.24 Design plane view of pier.	40
Fig. 3.25 Cross section of pier.	40
Fig. 3.26 Design plane view of wavebreaker.	41
Fig. 3.27 plane view of steel pipe pile of wavebreaker.	41
Fig. 3.28 Drag Coefficient for the (a)two dimensional and (b)three dimensional body(Fluid Mechanics, 2002).	42
Fig. 3.29 The result of sensitivity analysis for the plate structures.	44
Fig. 3.30 The result of sensitivity analysis for the cylindrical pile.	45
Fig. 3.31 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., pile type structures).	47
Fig. 3.32 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (ebb max., pile type structures).	48

Fig. 3.33 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., detail region, pile type structures).	49
Fig. 3.34 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (ebb max., detail region, pile type structures).	50
Fig. 4.1 Difference of tidal current in flood Max (gravity type structure).	52
Fig. 4.2 Difference of tidal current in ebb Max (gravity type structure).	53
Fig. 4.3 Difference of tidal current in flood Max.(pile type structure).	55
Fig. 4.4 Difference of tidal current in ebb Max.(pile type structure).	56
Fig. 4.5 Schematic view of tidal exchange ratio and residence time.	61
Fig. 4.6 Region of particle release.	71
Fig. 4.7 Water exchange rate variation each tidal periods (gravity type structures).	72
Fig. 4.8 Water exchange rate variation each tidal periods (pile type structures).	73
Fig. 4.9 Section position to the sea water transport capacity.	74
Fig. 4.10 Variation of tidal amplitude during 25 hours(spring tide).	75
Fig. 4.11 Time variation of sea water transport capacity in section A. ..	76
Fig. 4.12 Time variation of sea water transport capacity in section B. ..	77

List of Tables

Table 3.1 Tidal harmony constants at the open boundary	13
Table 3.2 Input parameters for the hydrodynamic model	13
Table 3.3 The result of tidal elevation verification(Mean Spring tide)	17

List of Symbols

C	Chezy coefficient
C^*	air-water interfacial resistance coefficient(= 2.6×10^{-3})
D_L	longitudinal dispersion coefficient
D_T	transverse dispersion coefficient
f	Coriolis force
g	gravitational acceleration
H	total depth of flow(= $h + \eta$)
h	depth
$h_{i,j}$	the average depth in cell(i,j)
K	diffusion coefficient
D_{xx}, D_{yy}	depth averaged longitudinal dispersion and turbulence diffusion coefficient to the x, y directions
k	roughness length
M	total mass
$m = M/N$	the mass of each particle
N	total particle number
n	Manning's roughness coefficient
$n_{i,j}$	the number of particles falling in cell(i,j)
R	normally distributed random numbers with zero and standard deviation
t	time
U, V	depth mean velocity components in the x and y directions respectively
U_*	friction velocity
\vec{U}	advective velocity
\vec{u}	dispersive velocity component

List of Symbols(Continued)

W_x, W_y	wind speeds in the x and y directions
β	correction factor for non-uniformity of the vertical velocity profile
x, y	2-dimensional coordinates
$\Delta x, \Delta y$	grid size in the x and y directions respectively
ε	depth mean eddy viscosity(= $10m^2 / \text{sec}$)
η	water surface elevation above or below datum
$\theta = \tan^{-1}(v/u)$	velocity in x, y direction
ρ	fluid density(= $1026kg/m^3$)
ρ_a	air density(= $1.25kg/m^3$)
C_F	average salinity of water entering the estuary in the flood flow
C_E	average salinity of water entering the estuary in the ebb flow
C_0	salinity of the outer basin water
M_0	material amount in the bay
Q_F	flow rate during flood flow
q_o	outflow volume of the inner bay in the first time
ξ	water age of the material
τ	residence time of the material

Hydrodynamic Numerical Simulation on the Pile Type Structures

Sung-Geun Bae

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry
Pukyong National University*

Abstract

Existing coastal protection structure were mainly composed of gravity type. Gravity type structures result in many problem which are around morphology change, seawater flow change and so on. Therefore it is required to design of new type structure. Pile type structures get into the spotlight due to environmental and functional advantages. In this paper examined hydrodynamic change due to construct of pile type structures. Modified two dimensional hydrodynamic model(DIVAST) used to simulation of tidal current. Numerical test were composed of present stage, case of the gravity type structures constructed and case of pile type structures constructed. Difference of flow velocity, water exchange rate and water transport capacity were calculated and compared to gravity type and pile type result. Calculated results showed pile type structures reduce to flow velocity change and increase to water exchange rate. Therefore pile type structures prove to have much advantages than gravity type structures.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

연안역은 많은 인구가 집중되어 있고 수많은 해양산업시설의 건설로 인해서 이들을 보호하기 위한 해안구조물의 설치가 뒤따르고 있다.

기존의 해양방재 구조물들은 주로 콘크리트로 이루어진 중력식 구조물이었다. 이러한 중력식 구조물들은 해안방호의 1차적인 목적을 달성할 수 있지만 주변의 수리현상에 커다란 변화를 야기할 수 있으며 이러한 수리현상의 변화로 인한 2차적인 주변지형의 변화 구조물 주변의 침식 등의 다양한 문제를 야기할 수 있다.

따라서, 최근에는 항만이나 해안구조물의 설계시 해역의 수리현상의 변화를 최소화 할 수 있는 친환경성 구조물의 설계가 요구되고 있으며, 이러한 파일식 구조물의 설계가 기능적, 환경적 측면에서 많은 관심을 일으키고 있다.

1.2 연구 방법 및 기대효과

다양한 해안구조물의 형상에 따른 수리현상의 변화는 수치모형실험과 수리모형실험을 통하여 고찰할 수 있다. 본 연구에서는 경제적이고, 시간 비용이 줄어드는 수치모형실험을 이용하여 수리현상 변화에 대한 다양한 고찰을 시도한다. 해수중에 파일식 구조물과 같은 저항물체가 존재하는 경우에 대한 연구에 대하여 살펴보면 이·박(1995)은 수하식 양식시설의 유수저항의 평가에 대하여 수심적분된 2차원 모형을 적용하였고, 박 등

(1998)은 저항물체 배후의 2차원 후류에 관한 대격자 수치모형에 대하여 연구한 바 있다.

본 논문의 2장에서는 본 연구에 사용된 수치모형에 대하여 설명하고, 3장에서는 본 연구의 대상해역인 부산시 영도구 일원의 현상태, 중력식 구조물 설치시 그리고 파일식 구조물 설치시에 대한 해수유동을 시뮬레이션하고 4장에서는 3장의 해수유동계산결과를 이용하여 각각의 구조형식에 따른 유속변화, 해수교환율의 변화, 해수소통량의 변화 등의 제반 수리현상의 변화를 파악한다.

2. 수치모형의 개요

본 연구에서는 기존에 사용되어오던 수심적분한 2차원 모형(DIVAST, 1987)을 구조물이 존재하는 경우에 대하여 기본방정식을 수정한 수정모형(박 등, 1998)을 사용한다.

2.1 DIVAST 모형의 개요

해수유동모델은 수심적분된 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법(FDM)에 의하여 해석하는 모델로서 1986년 Falconer에 의하여 개발된 DIVAST(Depth Integrated Velocity And Solute Transport) 모형의 개요는 다음과 같다.

기본방정식은 식 (2.1)부터 식 (2.3)까지의 연속방정식과 x 및 y방향의 운동량방정식이다. 여기서, 이류항은 조류의 연직방향속도분포를 고려하기 위하여 에너지 보정계수 β 를 도입하였으며, 지구자전으로 인한 편향력(Coriolis force)을 고려하고, 바람에 의한 해면에서의 바람응력을 고려할 수 있는 항을 추가하였다.

저면마찰응력은 저면의 조도와 수심 및 난류에 인한 Re수를 고려하여 저면마찰계수를 평가할 수 있는 Chezy의 저면마찰계수를 사용하였고, 운동량 확산은 주류와 직각방향으로의 운동량의 확산인 전단확산(shear dispersion)을 고려할 수 있도록 항을 추가하였으며, 이때 수심평균된 와동점성계수 ε 은 개수로에서 실험자료를 이용하여 평가된 식을 사용하였다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

- x 방향의 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} \right) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - \frac{\rho_a C^* W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} + \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H^{1/3}} \\ - \epsilon H \left(2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

- y 방향의 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} \right) + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ - \frac{\rho_a C^* W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} + \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H^{1/3}} \\ - \epsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서,

x, y : 2차원 직각좌표

t : 시간

H : 전수심 ($h + \eta$)

h : 수심

η : 정수심으로부터 자유표면까지의 높이

U, V : x, y 방향의 수심평균유속

g : 중력가속도

f : Coriolis 계수 ($2\omega \sin \phi$)

ρ_a : 대기의 밀도(1.25kg/m³)

C^* : 해면마찰계수(0.0026)

W_x, W_y : 풍속의 x, y 방향 성분

ρ : 해수밀도(1,026 kg/m³)

C : Chezy의 저면마찰계수

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

f_b : Darcy-Weisbach 저항계수

k_s : 조도높이

$\frac{4uH}{\nu}$: Channel Reynolds Number

$$\bar{u} = \sqrt{U^2 + V^2}$$

β : 에너지 보정계수($\beta = \frac{1}{U^2 h} \oint_A u^2 dA$)

$\beta = 1.016$ (속도분포의 1/7 승칙)

$$\beta = \left[1 + \frac{g}{C^2 K^2} \right]$$

k : Von Karman 상수(=0.4)

ϵ : 수심평균된 와동점성계수

본 모델의 특징으로서는 기본방정식의 모든 항들을 공간 및 시간에 대하여 중앙차분을 취하여 삼중대각행렬을 구성하여 ADI법으로 계산하였으며, 공간적으로는 staggered grid scheme을 사용하고 있다. 비선형이류항은 수치계산상의 효율을 높이기 위하여 음해법으로 반복계산하여 차분방정식을 풀게 되므로 계산시간간격 Δt 는 CFL 조건에 의한 Courant 수를 일반적인 ADI법

에 의한 값보다 2배 이상 크게 잡아도 안정된 수치해를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다.

$$\Delta t \leq 8 \sqrt{\frac{\Delta x}{gh_{\max}}} \quad (2.4)$$

여기서, Δx 는 계산격자간격, h_{\max} 는 계산영역에서 최대수심이다.

한편, 계산영역은 육지부, 해상부의 폐경계, 하천이나 외해와 접한 개경계 및 조석간만의 차로 인한 간석지 등과 같은 영역으로 나뉘게 되는데, 본 모델에서는 간석지에서 수위변화로 인한 경계의 이동이 가능하도록 되어 있으며, 개경계에서는 유속이나 수위에 의한 제어가 선택적으로 가능하도록 되어 있다.

Fig. 2.1은 DIVAST모델의 계산흐름도를 나타낸다.

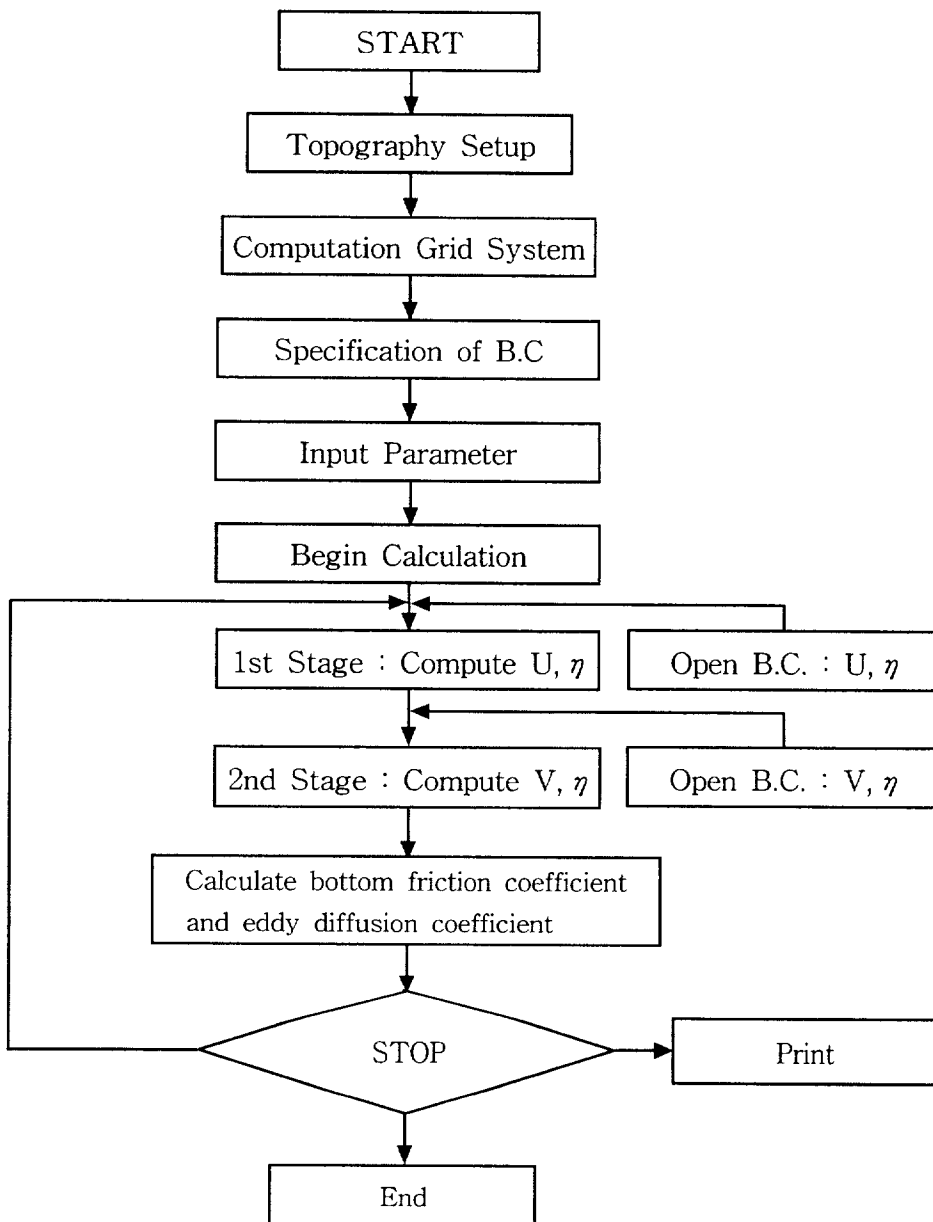


Fig. 2.1 Flow chart of the DIVAST model.

2.2 저항물체의 항력을 고려한 기본방정식의 수정

어떤 물체가 유수중에 놓여있는 경우 이 물체와 유체사이에는 상호작용이 발생하며, 이러한 효과는 유체와 물체의 경계면에서 힘과 관련된 항으로 나타낼 수 있다. 이 힘은 점성효과에 의한 벽면전단응력(wall 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 어려우므로 일반적으로 항력계수 C_D 를 도입하여 다음과 같이 유속에 의한 이차식으로 나타낸다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D \vec{U}_a |\vec{U}_a| \quad (2.5)$$

여기서, A_D 는 물체의 흐름방향에 대한 투영면적 그리고 \vec{U}_a 는 접근유속 (approach velocity) 벡터이다. 항력을 평가하기 위해서는 항력계수 C_D 의 결정이 중요하며, C_D 는 주로 물체의 형상과 Reynolds 수에 의존한다. 그리고 물체가 유수중에 여러개 존재할 경우, 항력은 식 (2.6)과 같이 단위면적당 항력 즉, 응력의 차원으로서 나타낼 수 있다.

$$\tau_D = \frac{n}{2} \rho C_D A_D \vec{U}_a |\vec{U}_a| \quad (2.6)$$

식 (2.2)와 식(2.3)의 운동방정식에 식 (2.6)과 같은 단위면적당 항력을 도입하여 수정된 운동량 방정식은 아래의 식 (2.7) 및 (2.8)와 같다.

-x 방향의 운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} \right) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - \frac{\rho_a C^* W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} + \frac{g U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H^{1/3}} \\ & + \frac{n C_{Dx} A_{Dx} U_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}}{2} - \epsilon H \left(2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

-y 방향의 운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} \right) + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & - \frac{\rho_a C^* W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} + \frac{g V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H^{1/3}} \\ & + \frac{n C_{Dy} A_{Dy} V_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}}{2} - \epsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

식 (2.7)과 식(2.8)에서 좌변의 여덟 번째 항은 유수 중에 놓여진 물체에 의한 항력을 고려한 항으로서 특히, n값은 실제 계산격자체계에서 식(2.9)와 같이 표현되며, U_a 및 V_a 는 물체의 상류측 한 격자 앞의 값을 사용한다.

$$n_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (2.9)$$

여기서, $m_{i,j}$ 는 그 격자내의 저항물체 개수 그리고 Δx , Δy 는 x, y 방향의 격자간격이다. 따라서, 식 (2.7)과 (2.8)은 저항물체에 의한 유수저항을 고려한 평균류에 관한 기본방정식이 된다.

3. 해수유동수치시물레이션

3.1 대상해역의 개요

본 연구에서는 현재 국내에서 파일식 구조형식을 채택한 새로운 해안 방제구조물 중에서 부산시 영도구 동삼동에 위치한 해경부두 방파제에 대하여 중력식 구조물과 파일식 구조형식을 채택한 경우에 각각에 대하여 해수유동을 수치시물레이션 한다. 본 연구에서는 수치계산의 영역을 동쪽으로는 오륙도 일원으로부터 서쪽으로는 부산광역시 중구 부근까지의 영역에 대하여 수치시물레이션을 수행한다.

3.2 현상태의 해수유동 수치시물레이션

3.2.1 계산영역 및 수심도

수치계산의 계산영역은 해도 No.202(국립해양조사원 발행)를 이용하여 사업지구 인근해역을 중심으로 하여 X축 방향으로 7.4km, Y축 방향으로 10.2km로 설정하였으며, 격자간격은 해경부두 설치위치 인근의 상세역에서 10m이고 나머지 영역에서는 20~80m까지 변화하는 가변격자 모형을 구축하였다. Fig. 3.1은 계산격자망을 나타낸다. Fig. 3.2는 대상해역의 현상태의 수심도를 나타낸다.

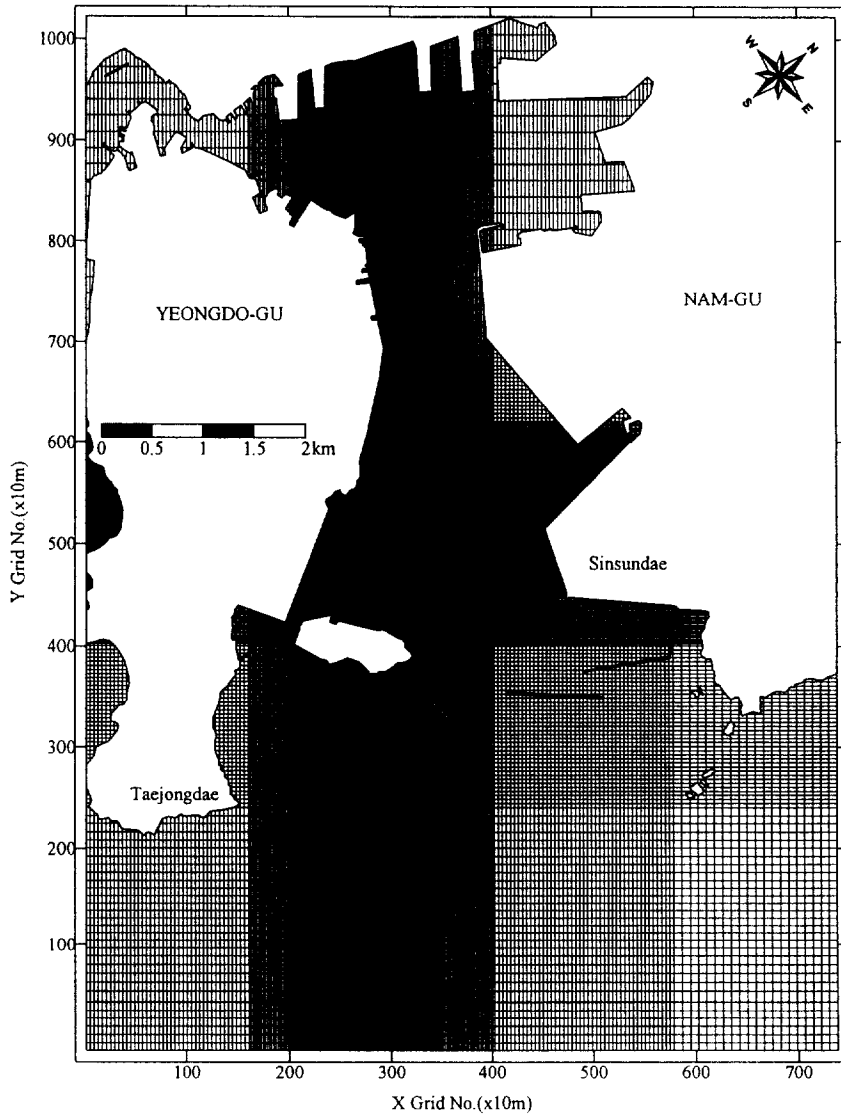


Fig. 3.1 Computational grid system.

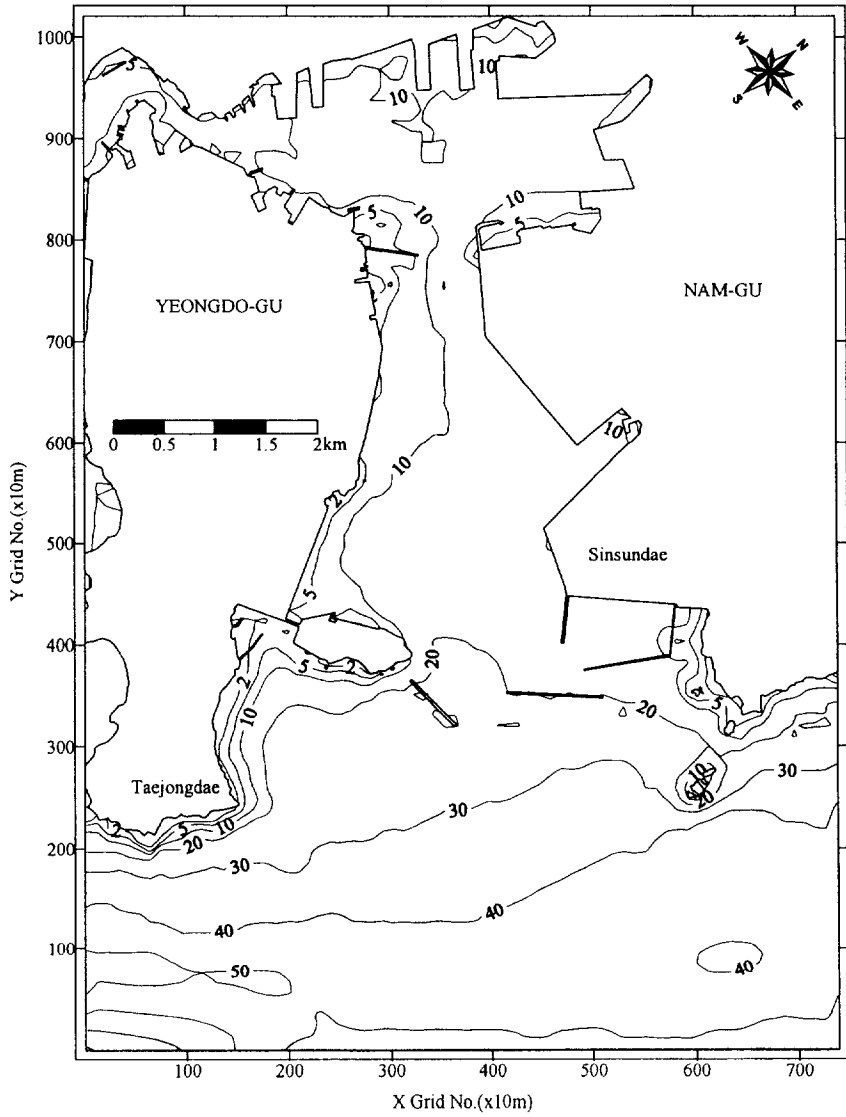


Fig. 3.2 Contour map of water depth below datum level.

3.2.2 계산조건

가) 경계조건

계산영역에서 조류를 재현하기 위하여 개경계에서 조위는 국립해양조사원의 조석관측성과표를 이용하여 주요 주태음반일주조(M_2), 주태양반일주조(S_2)의 반조차와 지각을 조석경계조건으로 하였다. Table 3.1은 개경계에서의 경계조건을 나타낸다.

Table 3.1 Tidal harmony constants at the open boundary

Location	M_2		S_2		K_1		O_1	
	H(cm)	G(°)	H(cm)	G(°)	H(cm)	G(°)	H(cm)	G(°)
Upper Yeong-do	40	233.0	19	263.0	4	137	2	112
Lower Yeong-do	38	232.5	19	262.5	4	135	2	106
Lower Left	38	232.0	18	262.0	4	134	2	105
Lower Right	37	229.0	16	258.0	4	134	2	104
Upper Right	37	227.5	17	257.1	4	135	2	105

나) 주요입력자료

해수유동모델링에 사용한 DIVAST 모델의 주요입력자료는 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Input parameters for the hydrodynamic model

계산조건 및 입력자료	사용된 값
격자망	$\Delta x = \Delta y = 10, 20, 40, 80m$ (300×290)
계산시간간격	$\Delta t = 1.0sec$
평균위도	35° 05' N
조도높이	80.0mm
에너지보정계수	$\beta = 1.016$
와동점성계수의 상수	$\varepsilon = 10.0$
공기밀도	1.25kg/m ³
해수밀도	1026.0kg/m ³

3.2.3 모델검증

가) 수위검증

해수유동수치모델의 재현성을 검토하기 위하여 Fig. 3.3에 나타낸 정점 T1, T2, T3에서의 수위계산결과를 현지관측결과와 비교하였다. 정점 T1은 국립해양조사원의 부산 검조소를 나타내고, 정점 T2는 (주)한국해양과학기술에서 1개월간 조위관측을 하였고, 정점 T3는 1개월간 조위관측이 이루어진 정점이다. Fig. 3.4는 총 50시간동안 수위의 관측치와 계산치를 비교한 그림이다. Table 3.3은 대조차의 계산결과와 관측결과를 비교한 것이다. 정점 T1, T2, T3에서의 대조차의 오차는 3%미만으로 수치계산된 수위는 현장관측결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

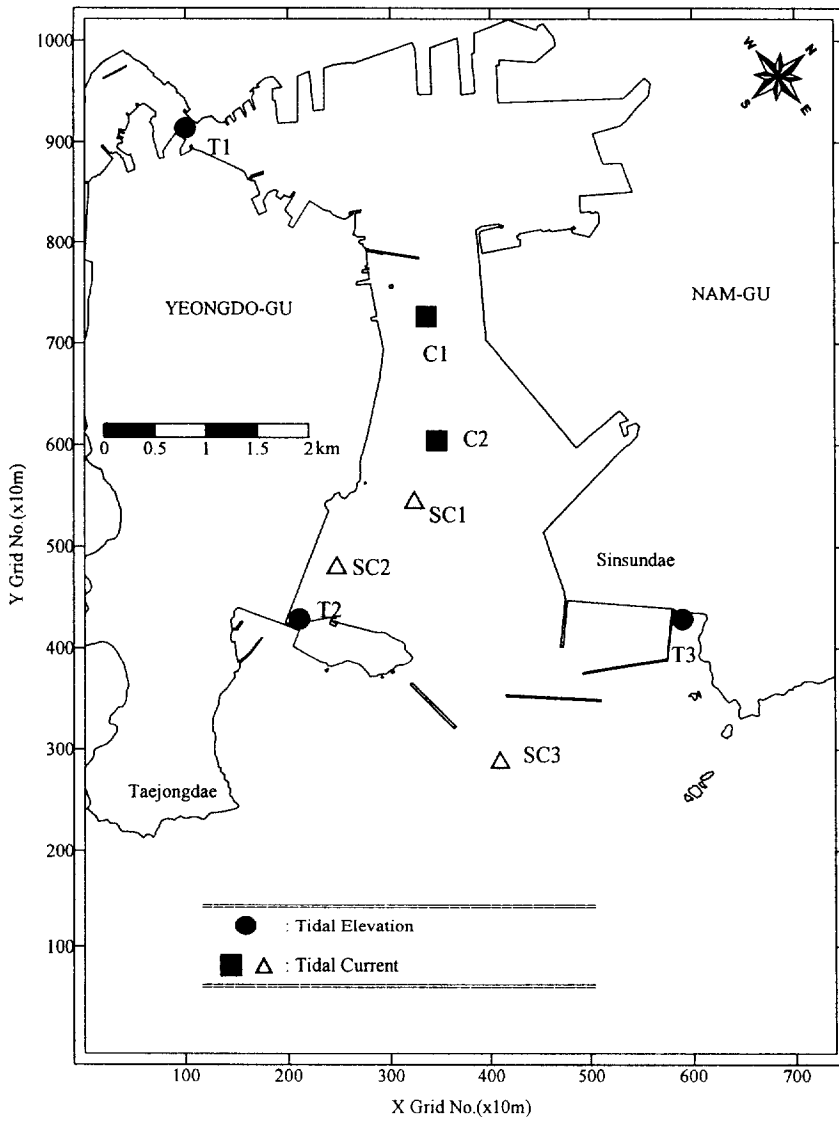


Fig. 3.3 Position of model verification point.

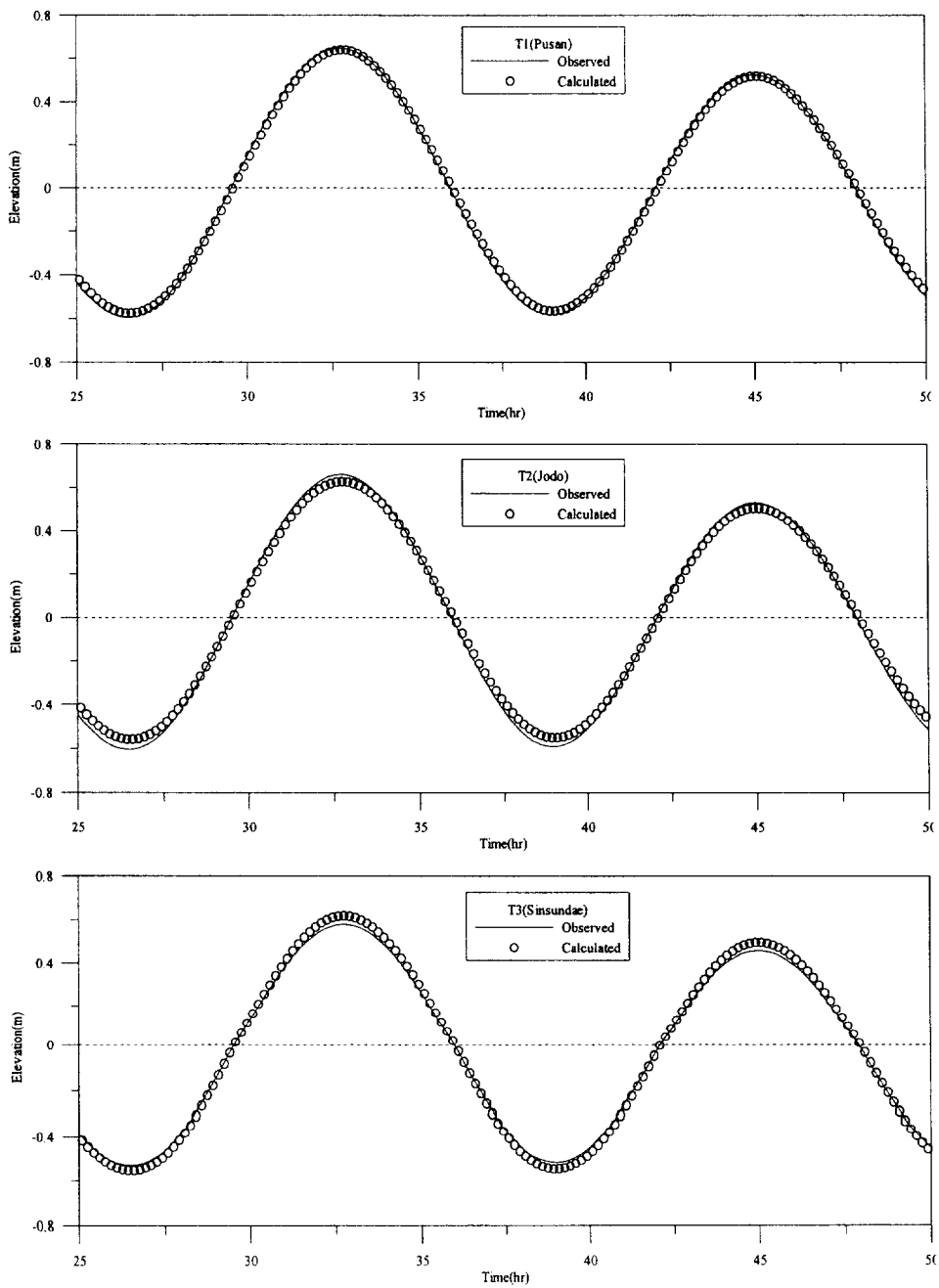


Fig. 3.4 Comparisons between observed and computed at the tide observation station.

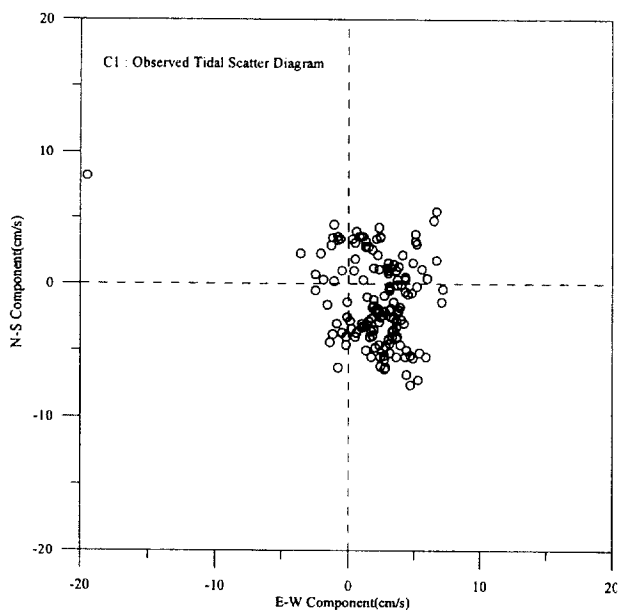
Table 3.3 The result of tidal elevation verification(Mean Spring tide)

Station	Observed(m)			Calculated(m)		
	L.W.	H.W.	Range	L.W.	H.W.	Range(Error)
T1	-0.596	0.647	1.243	-0.576	0.640	1.216(2.17%)
T2	-0.604	0.660	1.264	-0.578	0.627	1.205(3.8%)
T3	-0.528	0.578	1.1	-0.553	0.608	1.07(3.0%)

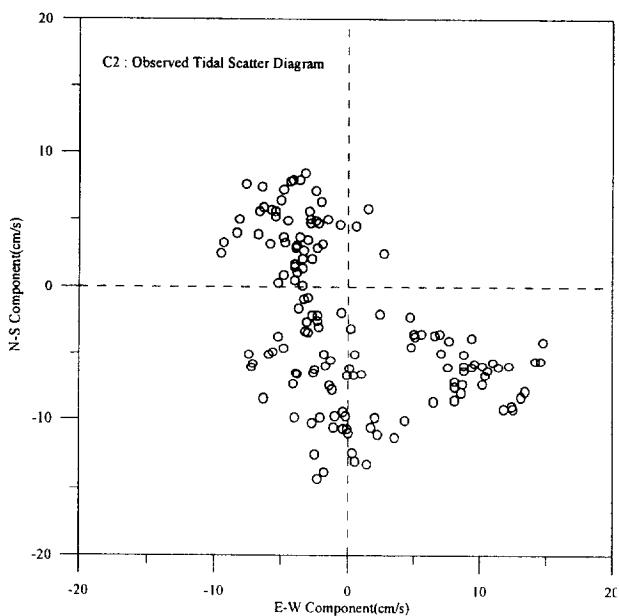
나) 유속 검증 결과

해수유동수치모델의 재현성을 검토하기 위하여 Fig. 3.3에 나타낸 정점 C1~C2 및 SC1~SC3에서의 유속계산결과를 현지관측결과와 비교하였다. C1~C2는 대조기 25시간동안 조류관측이 이루어진 정점이고, 정점 SC1~SC3는 SC1에서는 15일간, 나머지 정점에서는 25시간 총별 조류관측이 이루어졌다.

Fig. 3.5는 정점 C1~C2에서의 관측된 조류분산도를 나타내며 Fig. 3.6은 정점 SC1에서의 관측된 조류분산도와 잔차성분을 나타내는 것이다. Fig. 3.7은 정점 SC2와 SC3에서의 총별 조류관측결과를 나타낸다. 현지관측결과 대상해역의 조류의 주성분은 창조시 오류도 동쪽에서 유입하는 흐름패턴에 의해서 북서(NW)방향의 흐름이 탁월하며, 낙조시에는 반대로 남동(SW)방향의 흐름이 주축을 이룬다. Fig. 3.8~3.12는 각 정점에서 대조기 25시간 동안 계산된 조류의 분산도와 벡터도이다. 각 정점에서 계산된 결과는 현지관측결과와 비교하여 조류의 주축과 크기가 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다.



(a) C1



(b) C2

Fig. 3.5 The result of tidal current observation in the station C1, C2.

St. PC1 : June 28 ~ July 27, 2003

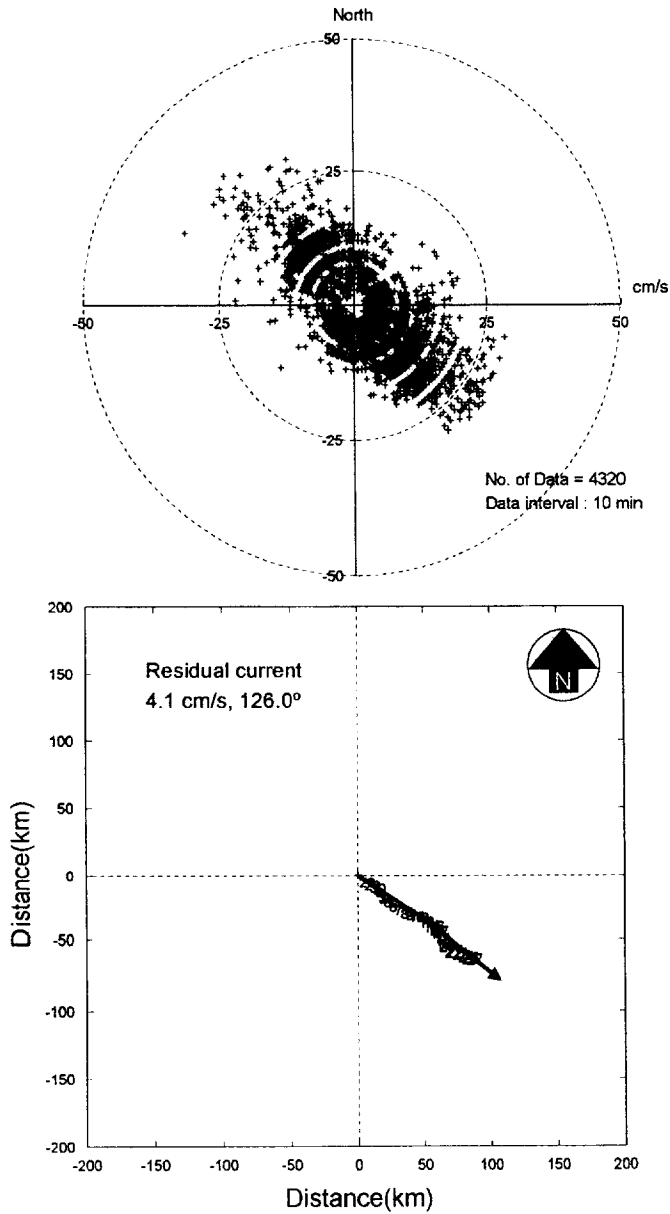


Fig. 3.6 The result of tidal current observation in the station SC1.

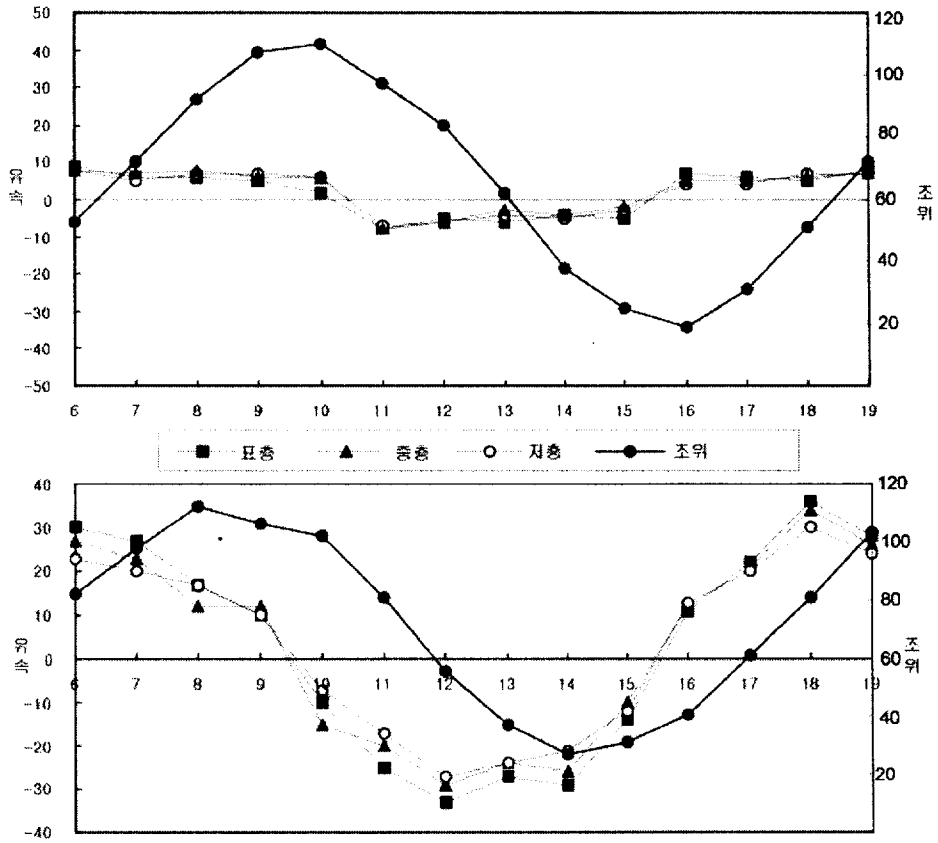
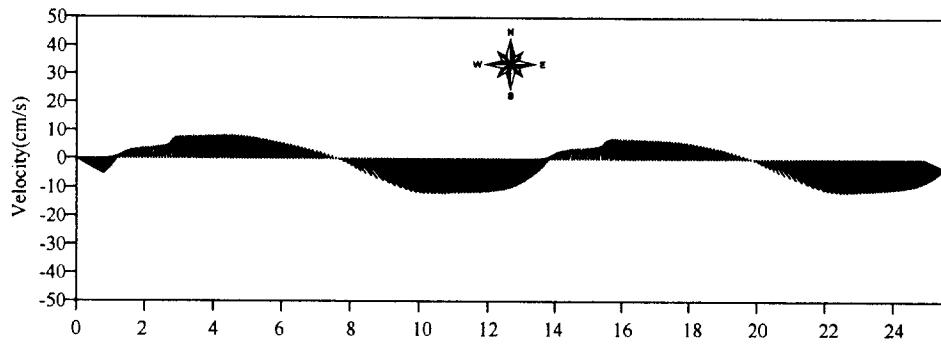
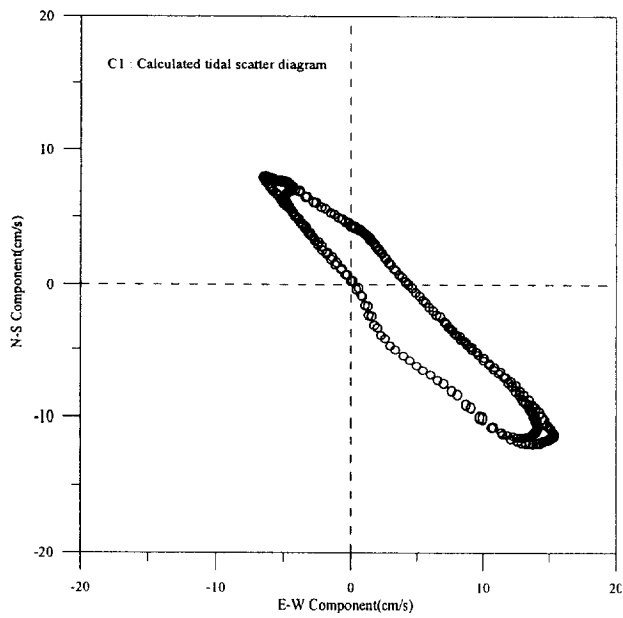


Fig. 3.7 The result of tidal current observation in the station SC2, SC3.

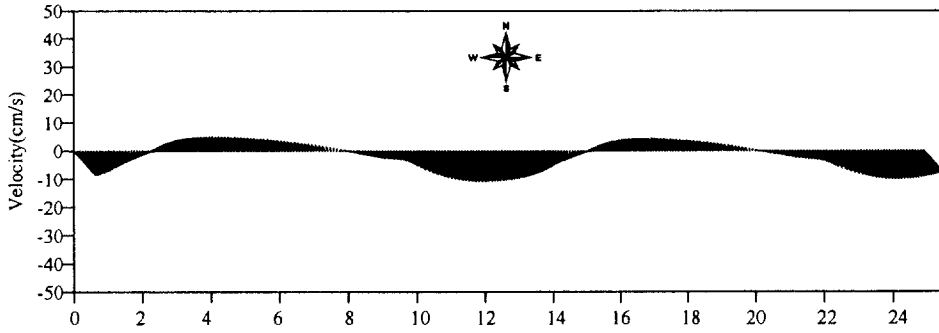


(a) Tidal stick diagram

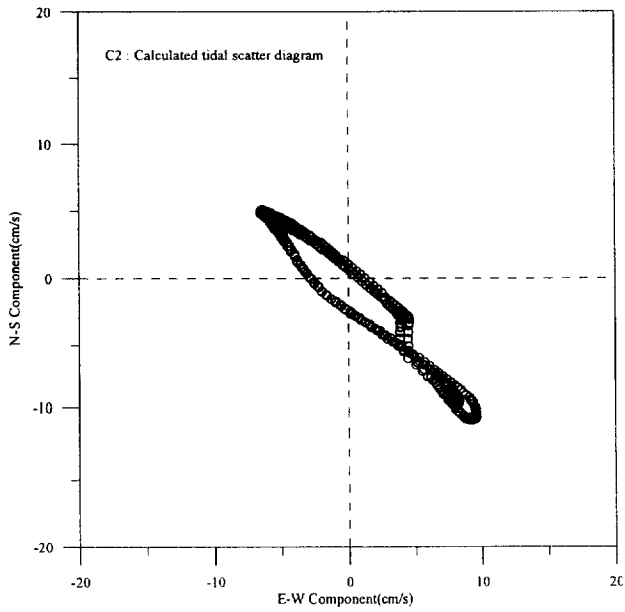


(b) Tidal scatter diagram

Fig. 3.8 Computed tidal current in the station C1.

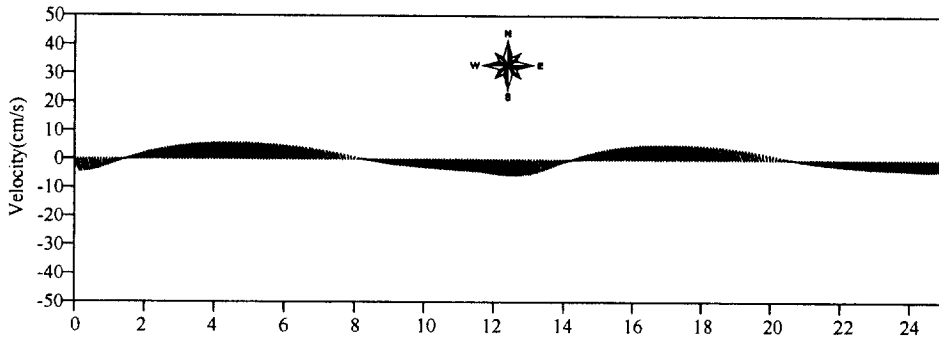


(a) Tidal stick diagram

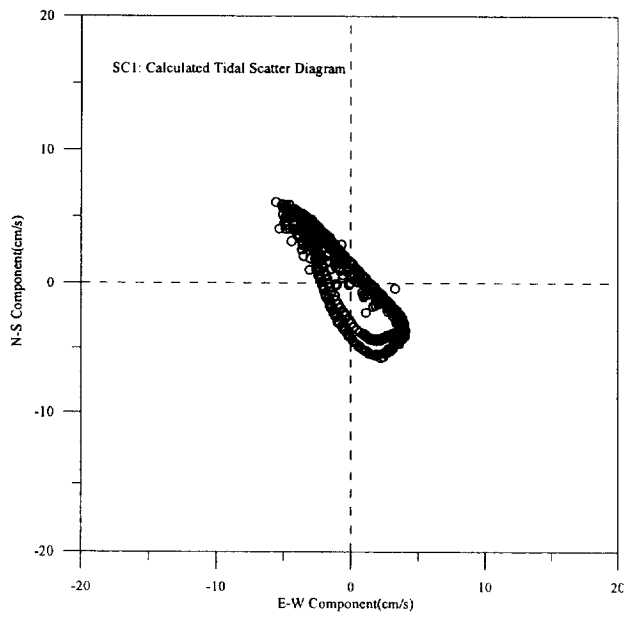


(b) Tidal scatter diagram

Fig. 3.9 Computed tidal current in the station C2.

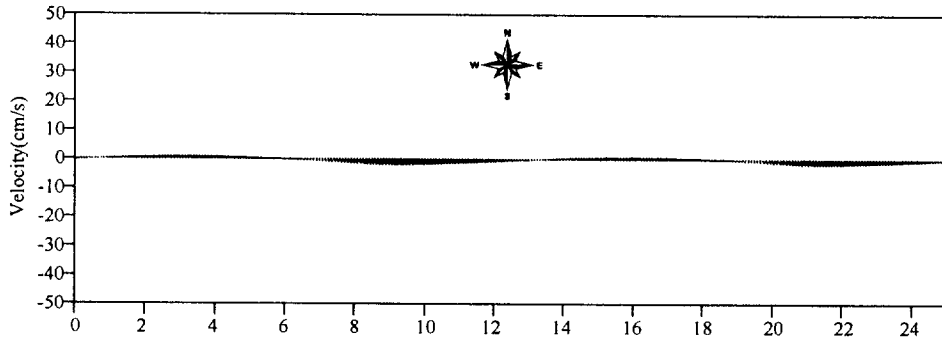


(a)Tidal stick diagram

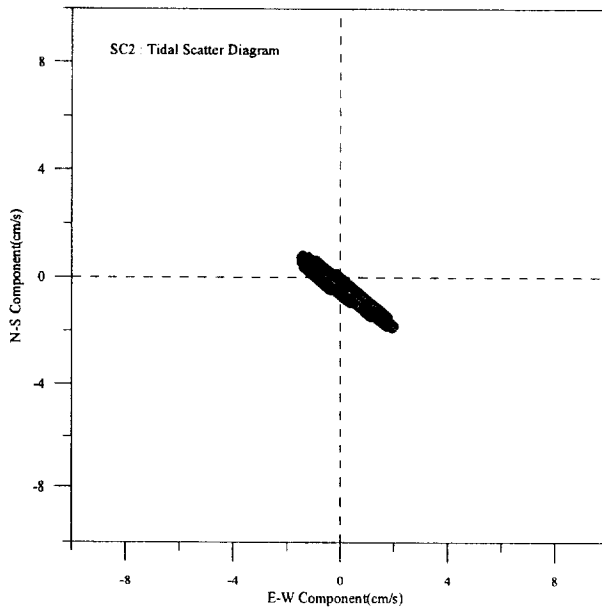


(b)Tidal scatter diagram

Fig. 3.10 Computed tidal current in the station SC1.

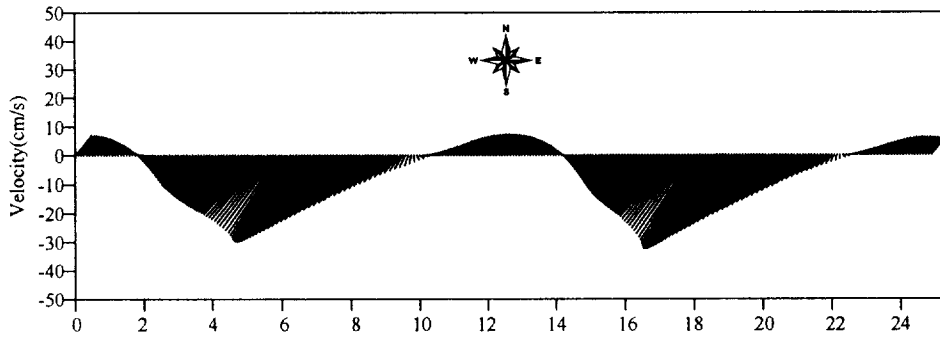


(a) Tidal stick diagram

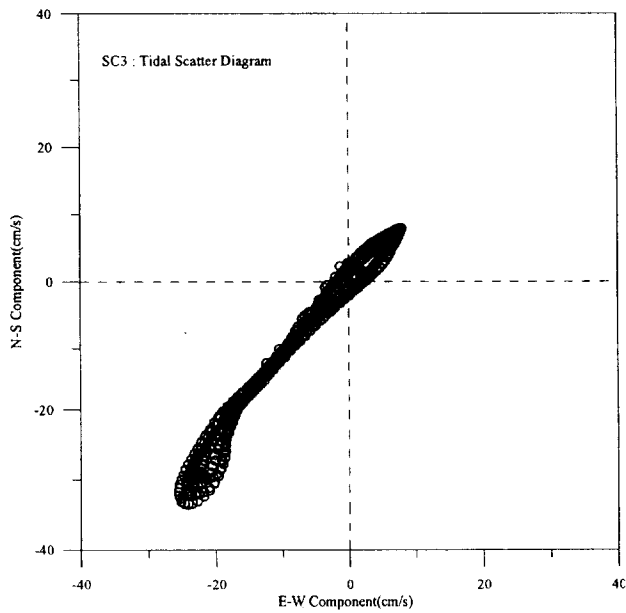


(b) Tidal scatter diagram

Fig. 3.11 Computed tidal current in the station SC2.



(a) Tidal stick diagram



(b) Tidal scatter diagram

Fig. 3.12 Computed tidal current in the station SC3.

3.2.4 해수유동 시뮬레이션 결과

전체 계산영역에서 현상태의 대조기의 해수유동계산결과를 나타낸 것은 Fig. 3.13~3.14와 같다. Fig. 3.13은 총계산시간의 마지막 25시간동안의 자료를 출력하여 나타낸 대조기의 창조류 최강류시의 해수유동을 벡터도이다. 그리고 Fig. 3.14는 낙조류 최강류시의 계산결과를 나타낸다. 과업대상해역을 중심으로한 상세한 해수유동패턴을 나타내기 위해서 가변격자망의 x, y방향 격자간격이 10m인 상세역에서 창·낙조류 최강류시의 해수유동패턴을 나타낸 것은 Fig. 3.15~3.16과 같다. 위의 그림들에서 본 대상해역인 영도구 동삼동 일대해역은 창조시 북서(NW)방향의 흐름이 탁월하고 낙조시에는 남동동(SE)방향의 흐름이 탁월한 형태를 띄며, 오류도 방파제 및 조도방파제 등의 건설로 인해 입퇴조량에 제한을 받아 대상해역부근의 창·낙조류 최강유속은 10cm/s 내외로 나타난다.

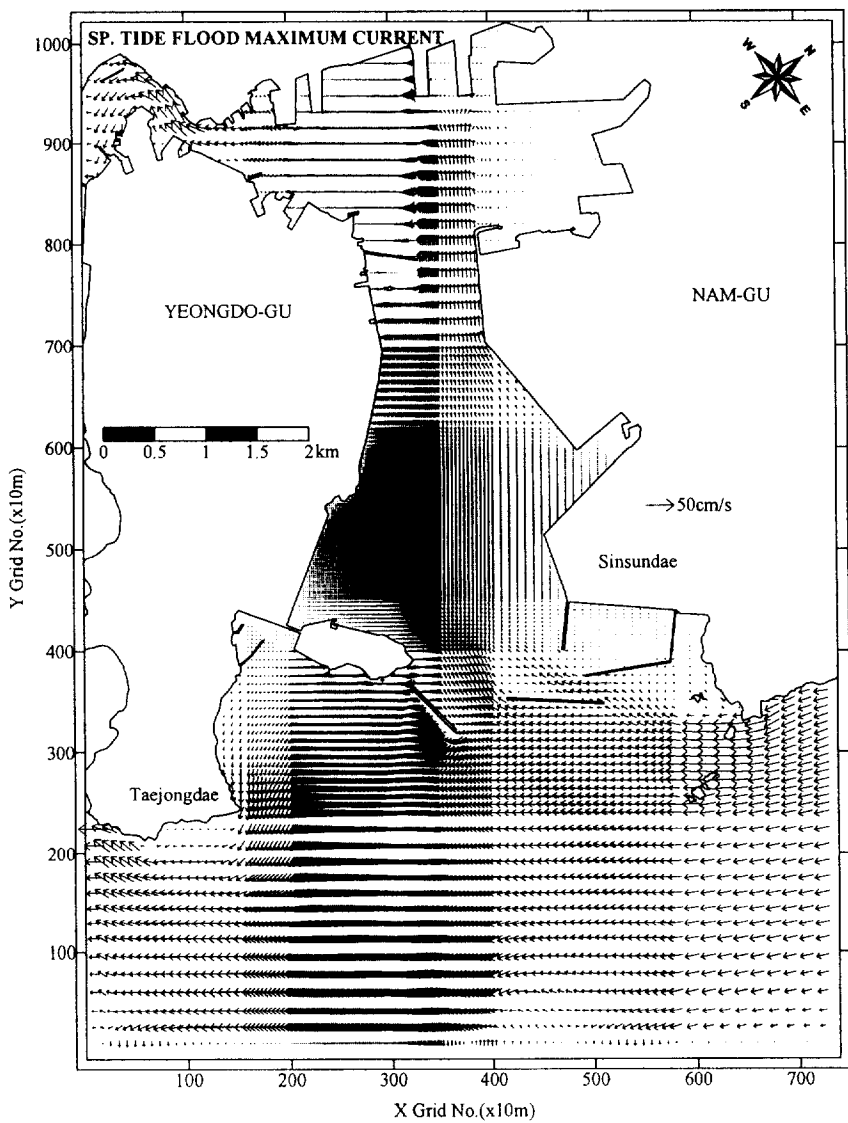


Fig. 3.13 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max.).

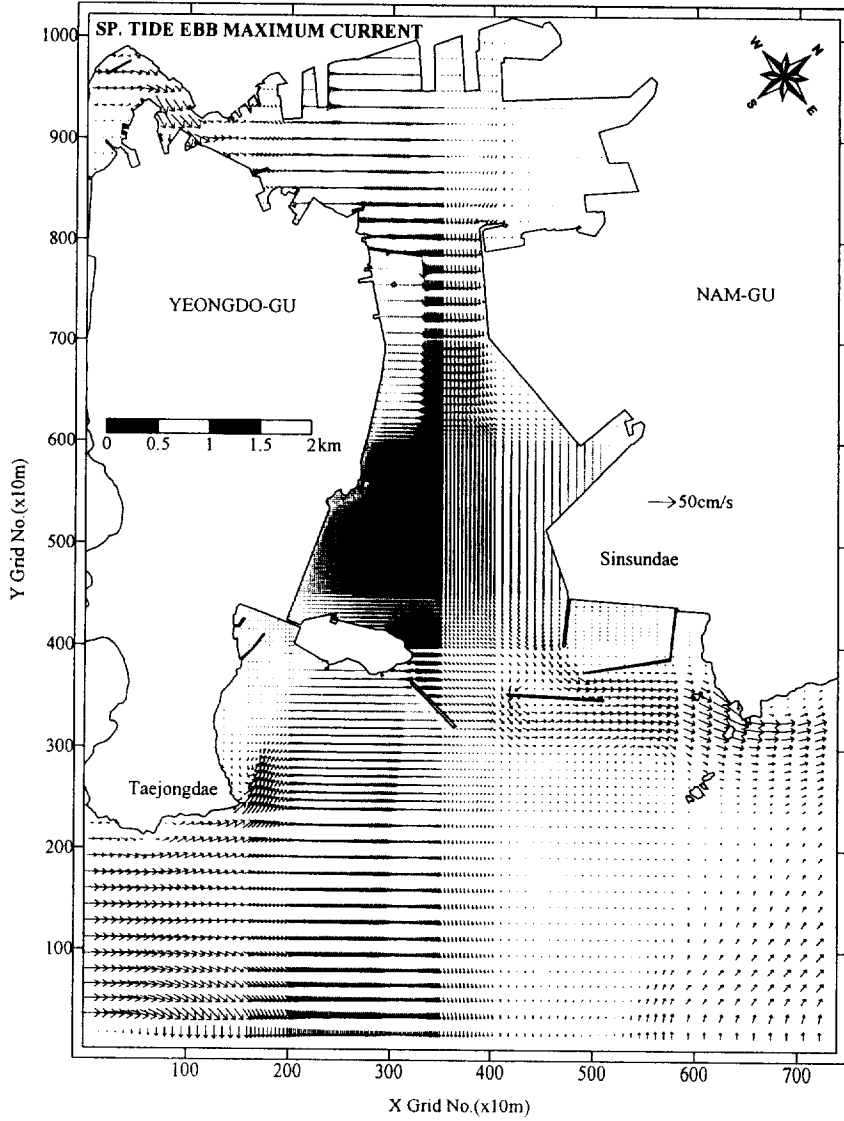


Fig. 3.14 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Ebb max.).

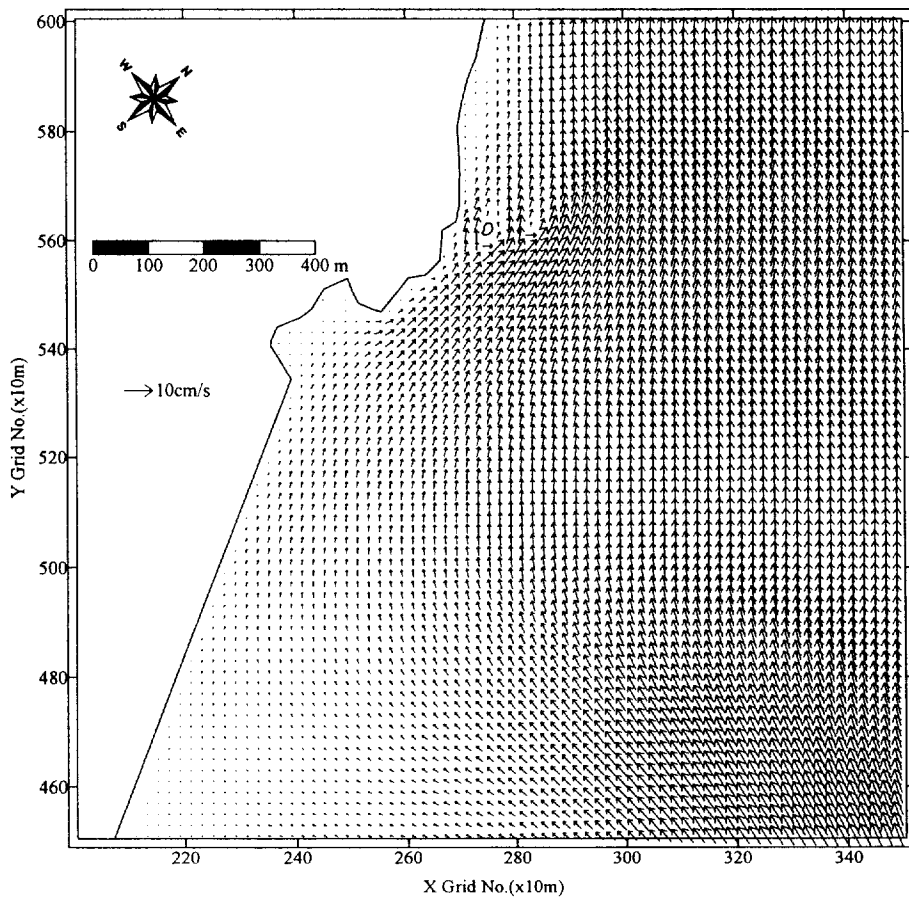


Fig. 3.15 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Flood max., detail region).

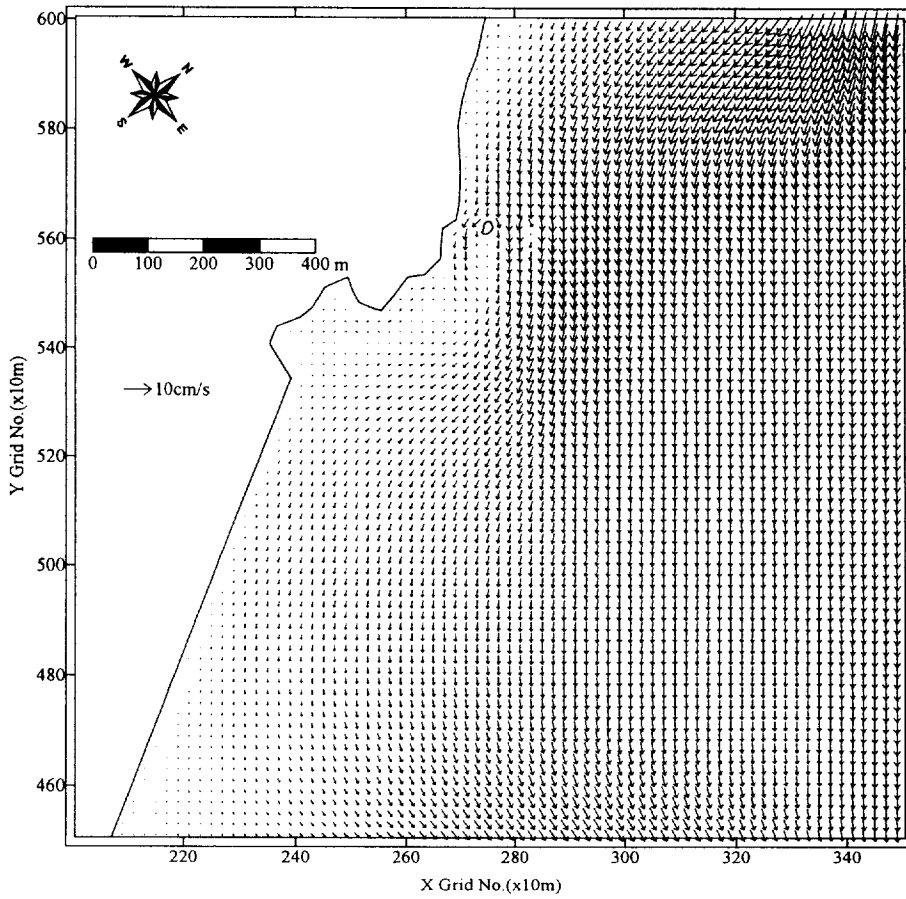


Fig. 3.16 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Ebb max., detail region).

3.3 중력식 구조물 설치시 해수유동 수치시뮬레이션

3.3.1 계산조건

현상태의 지형에 Fig. 3.17과 같은 배치평면도를 가지는 중력식 구조물을 설치한 경우에 대하여 해안매립 및 항로준설이 이루어진 후의 수심을 이용하여 해수유동을 계산하였다. 모델의 주요입력자료와 경계조건은 현상태와 동일한 조건을 사용한다. Fig. 3.18은 계산격자망을 나타내며, Fig. 3.19는 대상해역에서 중력식 구조물 설치 및 해안매립과 준설후의 수심도를 나타낸다.

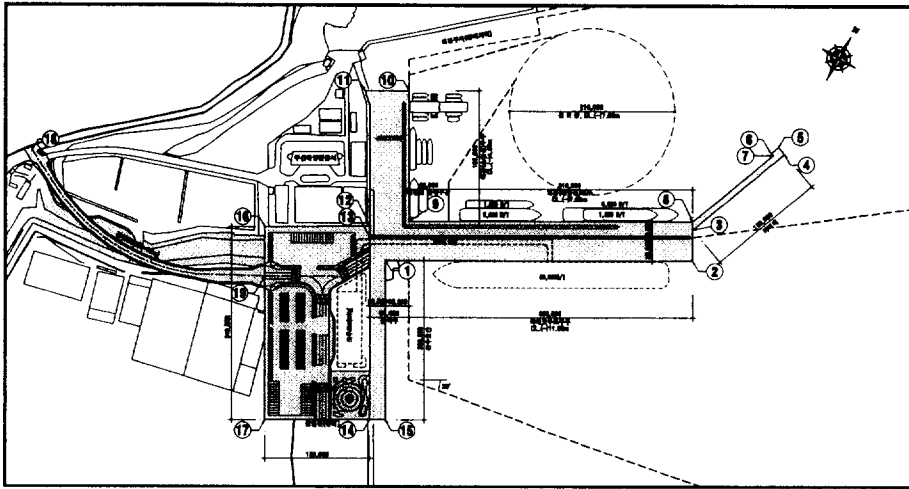


Fig. 3.17 Design of structure position.

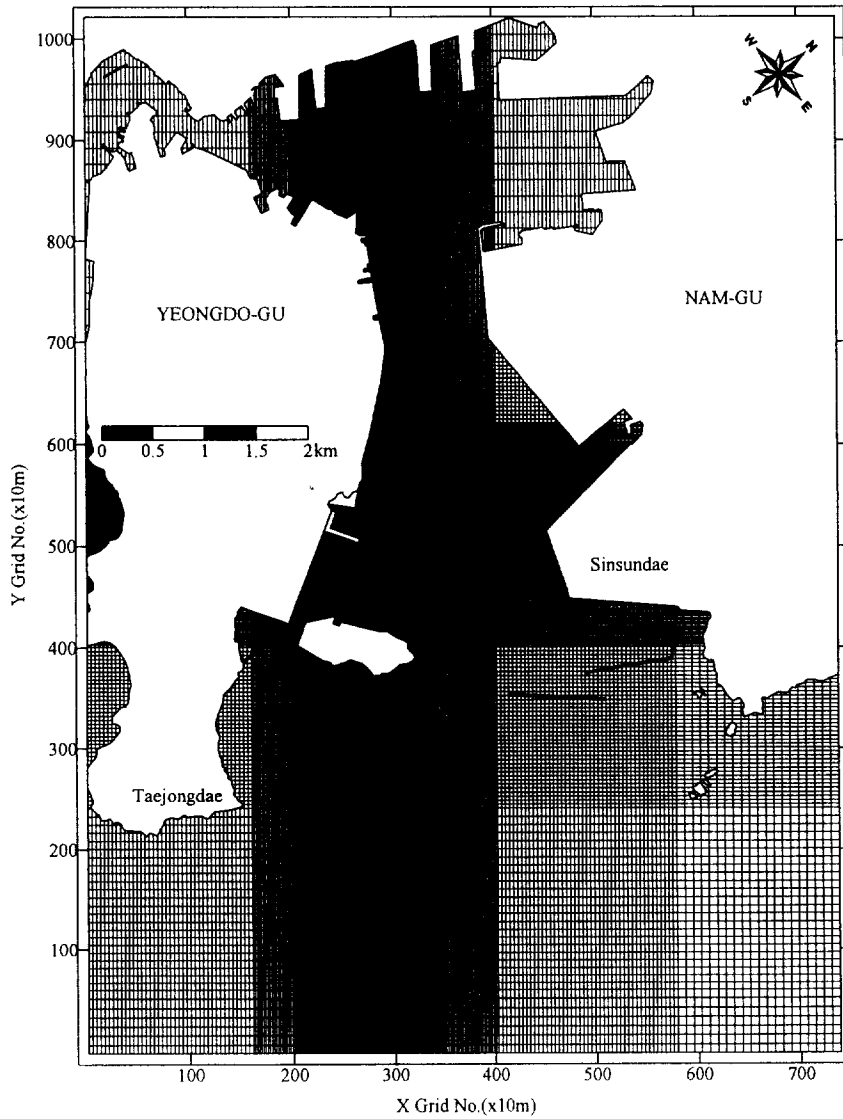


Fig. 3.18 Computational grid system that of gravity type structures.

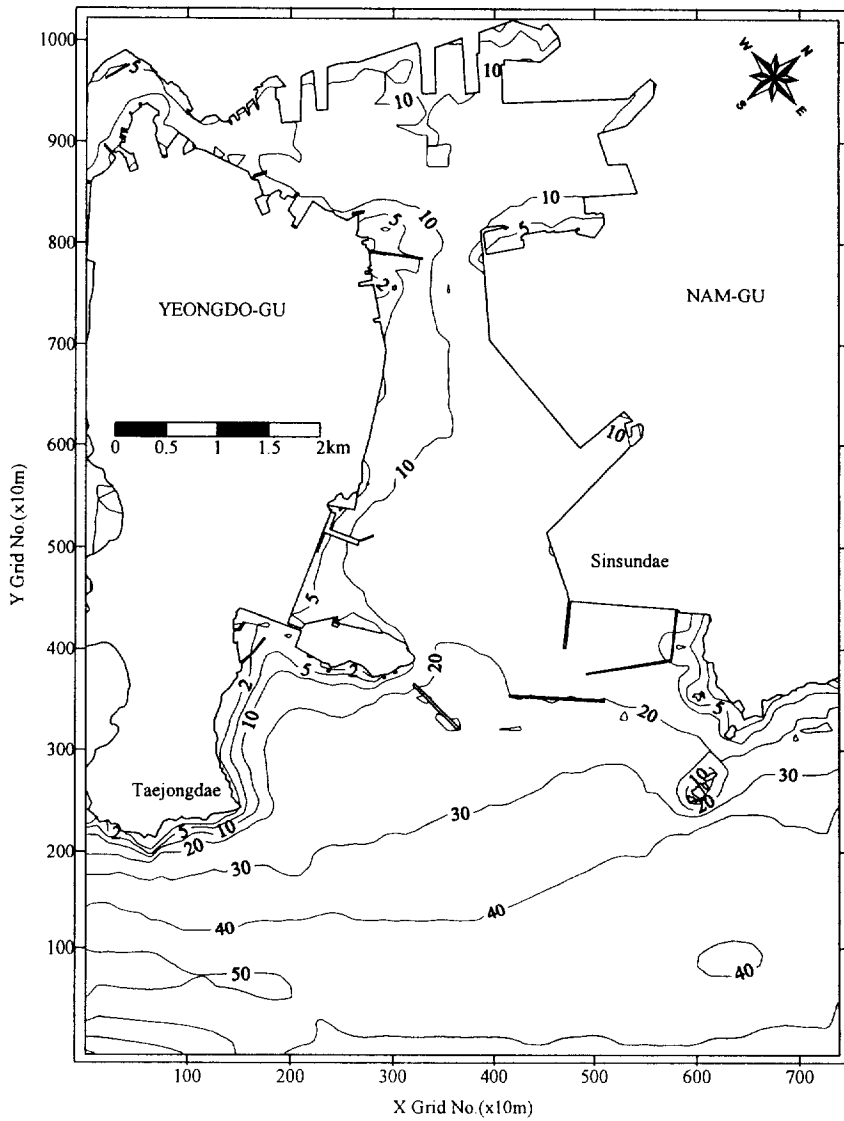


Fig. 3.19 Contour map of water depth below datum level that of gravity type structures.

3.3.2 해수유동시뮬레이션 결과

전체 계산영역에서 중력식 구조물 설치에 따른 시공후 대조기의 해수유동 계산결과를 나타낸 것은 Fig. 3.20~3.21과 같다. Fig. 3.20은 현상태 대조기 창조류시와 동일한 계산시각에서 출력된 창조류 최강류시의 해수유동을 나타낸 벡터도이다. 그리고 Fig. 3.21은 낙조류 최강류시의 계산결과를 나타낸다. 한편 상세역에서의 해수유동패턴은 Fig. 3.22~3.23과 같이 나타내어진다.

해수유동은 중력식 구조물의 배치에 따라 돌제부두 전면과 부두와 매립지 사이의 항내수역에서 유속의 감소가 나타나고, 파제대의 외곽부에서 유속이 상승하는 경향을 나타낸다. 그리고 창조시에는 파제제 북서쪽에서 와류가 생성되고 낙조시에는 파제제 남동쪽에서 와류가 형성되는 특징을 보인다.

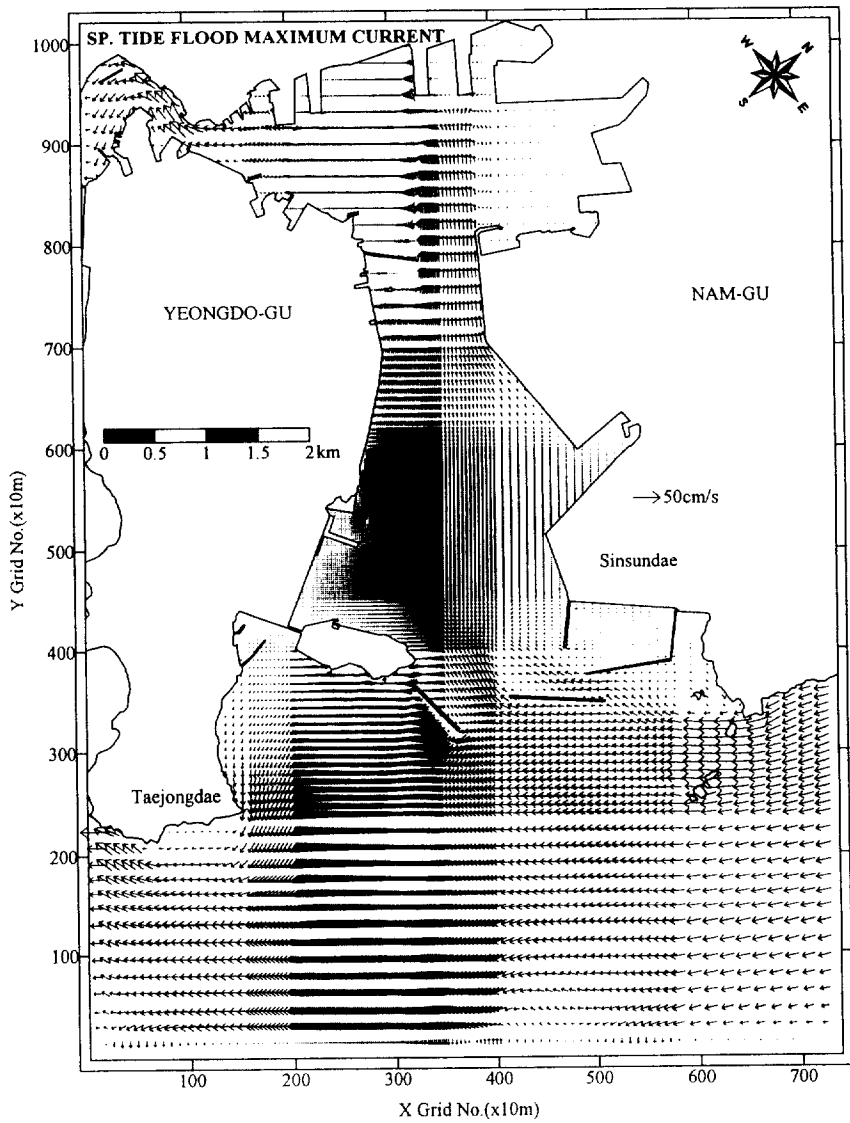


Fig. 3.20 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., gravity type structures).

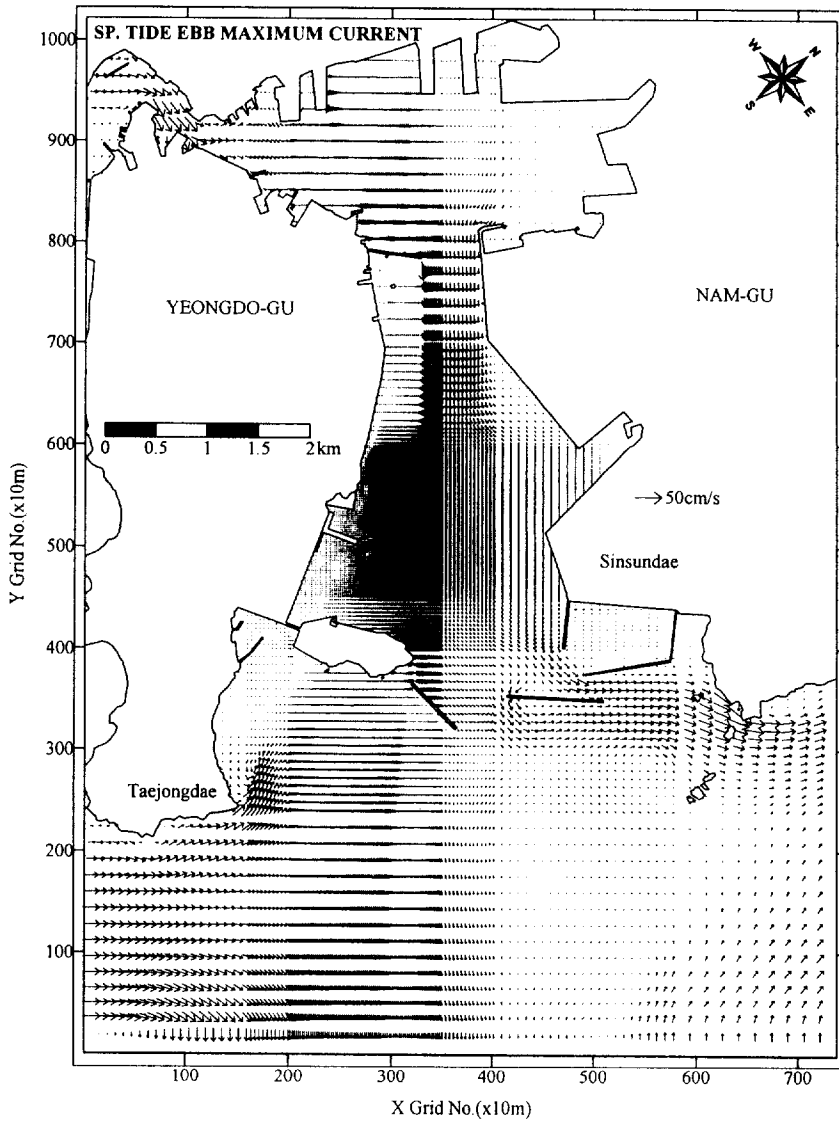


Fig. 3.21 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (ebb max., gravity type structures).

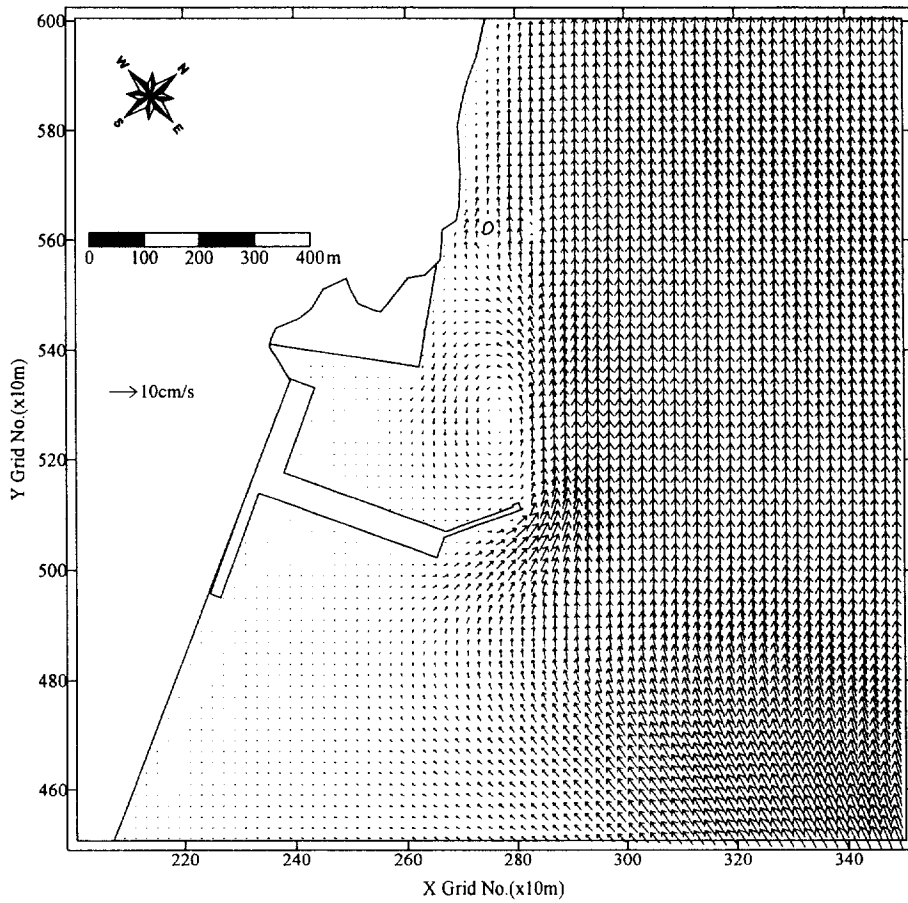


Fig. 3.22 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., detail region, gravity type structures).

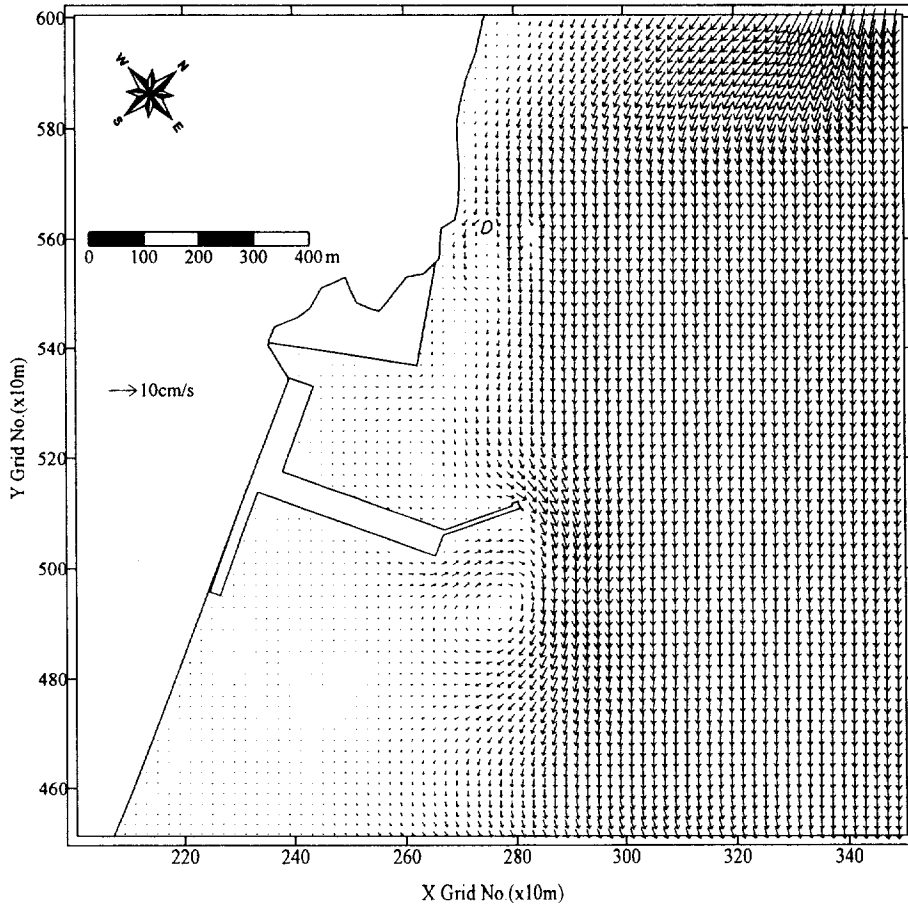


Fig. 3.23 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (Ebb max., detail region, gravity type structures).

3.4 파일식 구조물 설치시 해수유동수치시물레이션

3.3절의 중력식 구조물을 설치했을 경우와 비교하기 위해서 Fig. 3.17의 돌체부두와 파제체에 해수가 소통할 수 있는 투과형 파일식 구조물을 설치하였을 경우에 대한 수치시물레이션을 수행한다.

3.4.1. 항력계수의 평가방법

Fig. 3.24~3.27은 투과성 구조물이 존재하는 돌체부두와 파제체의 배치 평면도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적인 구조물은 평판과 원주형 말뚝으로 구성되어 있으며 돌체부두 일부분에서는 평판구조물이 2열로 배치되어 있다. 따라서, 각각의 격자점에서 평판식 구조물이 차지하는 폭과 원주형말뚝의 개수를 고려하여 각각의 격자점에서 항력계수를 산정해야 한다.

항력계수는 주로 Reynolds 수 Re 와 물체의 형상에 의해서 결정될 수 있다. Fig. 3.28은 난류흐름하에서 2차원 물체와 3차원 물체에 대한 항력계수(C_D)를 Re 에 따라 도시한 그림이다(White, 2002). 그림에서 난류인 경우 즉, $O(10^3) < Re < O(10^6)$ 인 유동범위에서는 C_D 가 거의 일정한 값을 가진다. 그리고, 대개 조류장의 경우 cgs 단위계에서 동점성계수가 $O(10^{-2})$, 길이 scale이 $O(10^1)$, 유속이 $O(10^1)$ 정도의 scale이므로 Re 는 $O(10^4)$ 값을 가진다. 따라서, 물체의 형상이 결정된다면 항력계수를 산정할 수 있다. 본 구조물 설계시 평판은 3차원 구조물로서 고려될 수 있고 Disk의 경우 약 2.0의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 한편 원주형 말뚝은 대상해역에서 말뚝의 직경과 길이의 비는 약 5의 값을 가지므로, 약 0.8정도의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

그러나, 특별한 형상을 갖는 물체에 대한 정확한 항력계수의 평가는 수리실험에 의하여 결정하지 않으면 안된다.

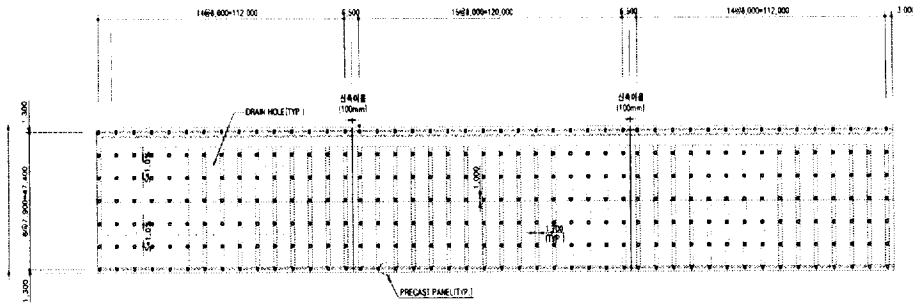
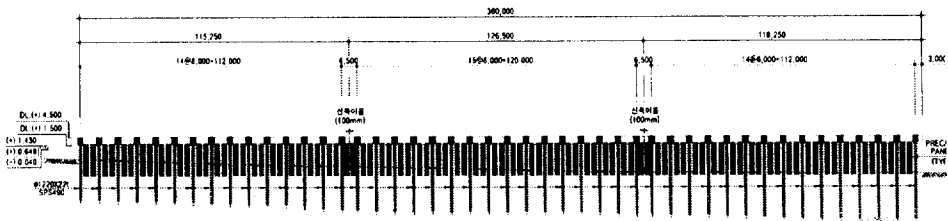
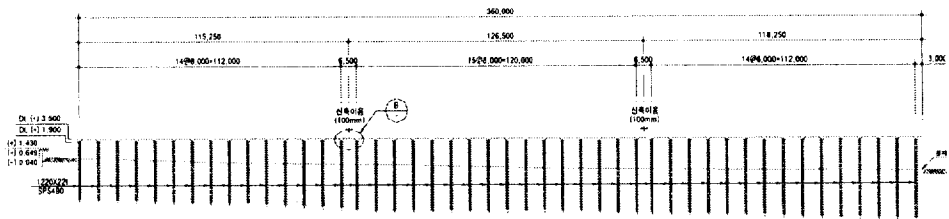


Fig. 3.24 Design plane view of pier.



SECTION A-A



SECTION B-B

Fig. 3.25 Cross section of pier.

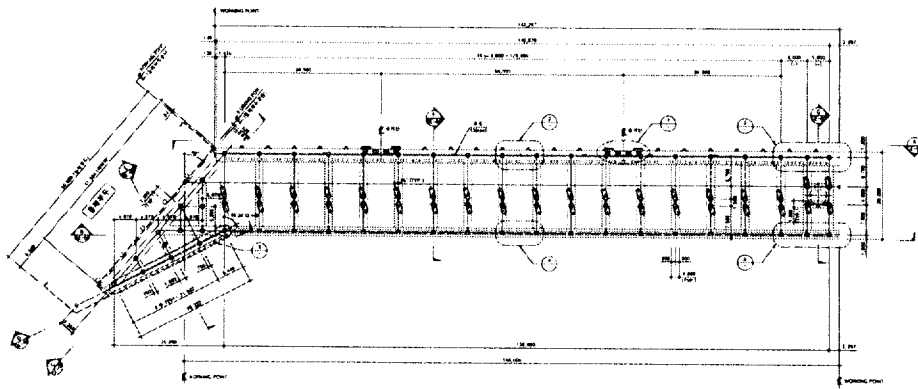


Fig. 3.26 Design plane view of wavebreaker.

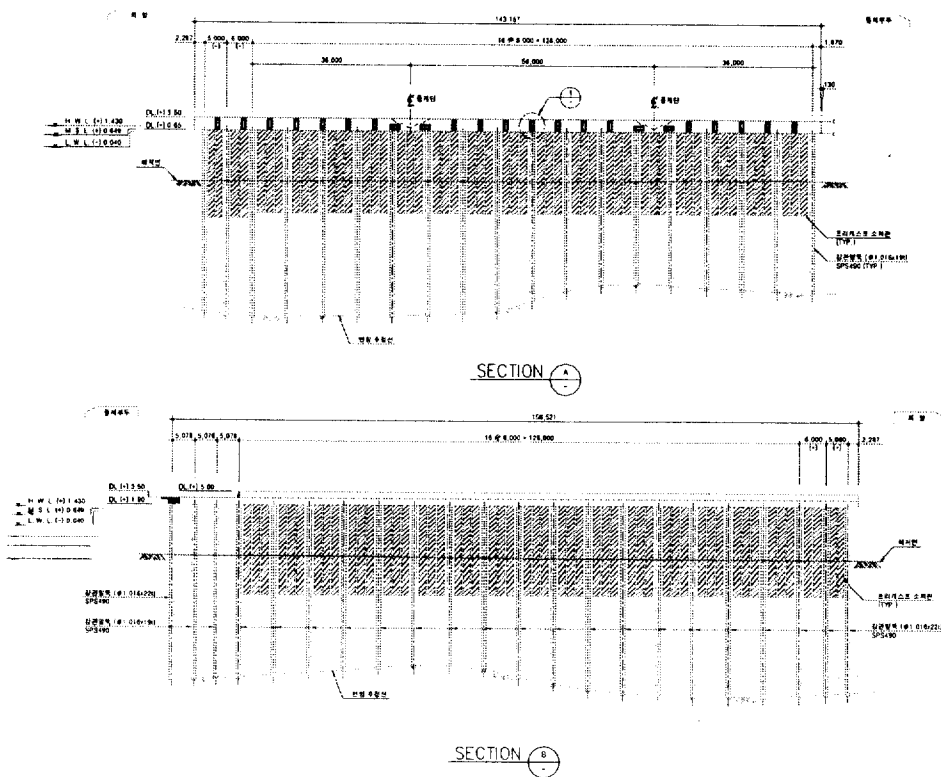
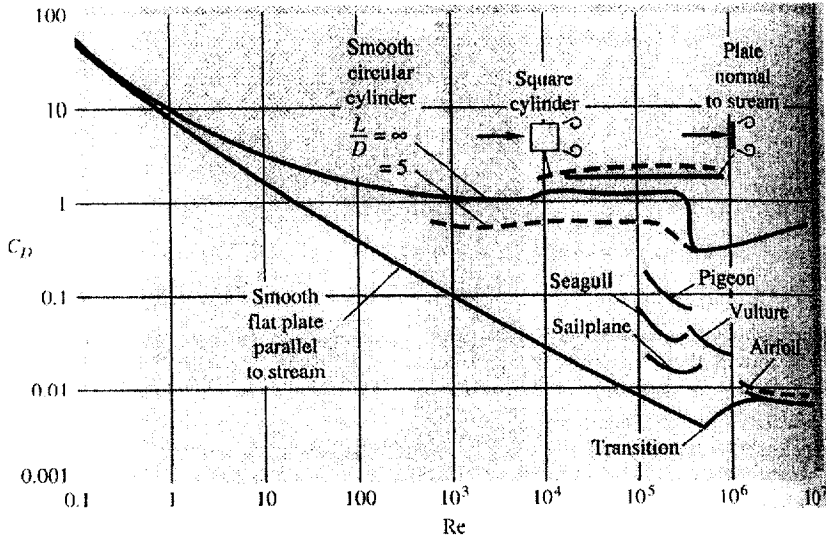
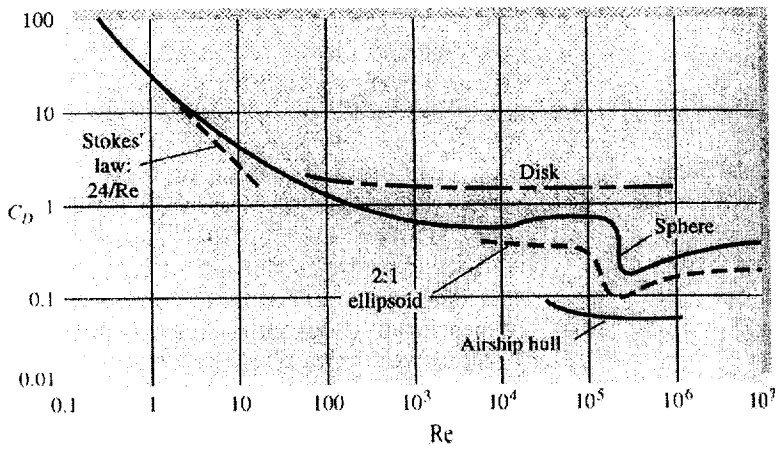


Fig. 3.27 plane view of steel pipe pile of wavebreaker.



(a) two dimensional body



(b) three dimensional body

Fig. 3.28 Drag Coefficient for the (a) two dimensional and (b) three dimensional body (Fluid Mechanics, 2002).

본 연구에서는 격자간격이 x, y 방향으로 모두 10m, 수심이 5m로 일정한 단순영역에서 평판과 원주형 말뚝이 존재하는 경우에 다양한 항력 계수에 따른 유속변화의 민감도를 평가하였다.

평판형 구조물이 존재하는 경우에, 각 격자마다 투영면적은 격자의 폭 (10m)×수심(5m)을 사용하였으며, 항력계수변화에 따른 U/U_0 값의 분포 변화를 도시하였다. 여기에서, U는 각각의 경우에 계산된 유속이고 U_0 는 구조물이 없는 단순수로에서의 계산유속이다. 항력계수 C_D 는 Fig. 3.28에서 Disk의 경우 약 2.0의 값을 가지는 것으로부터 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0 그리고 2.5의 값을 사용하였다.

원주형 구조물이 존재하는 경우에는, 각 격자의 저항물체는 직경 1m 인 실린더형 원주가 각 격자마다 5개 존재하는 것으로 가정하여 투영면적을 산정하고, 항력계수는 Fig. 3.28에서 볼 수 있듯이 L/D 가 5의 값을 가질 경우 약 0.8의 값을 가지므로 0.5~1.0의 값을 사용하여 계산결과에 따른 U/U_0 값의 분포변화를 도시하였다.

Fig. 3.29는 평판형 구조물이 존재하는 경우에 항력계수의 변화에 따른 유속변화분포를 나타낸다. 전체적으로 구조물 배후의 유속감소를 확인할 수 있고 항력계수 $C_D=2.0$ 일 경우에 구조물 배후의 유속은 구조물이 없는 경우의 60% 이하의 유속이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3.30은 원주형 말뚝이 존재하는 경우에 항력계수의 변화에 따른 유속변화분포를 나타낸다. $C_D=0.8$ 일 경우에 구조물 배후의 유속은 85% 정도로 나타남을 볼 수 있다.

그러나 특별한 형상을 갖는 물체에 대한 정확한 항력계수의 산정은 수리실험에 의하여 결정하여야 할 것이며 본 연구에서는 기존에 주어진 값들을 사용하였다.

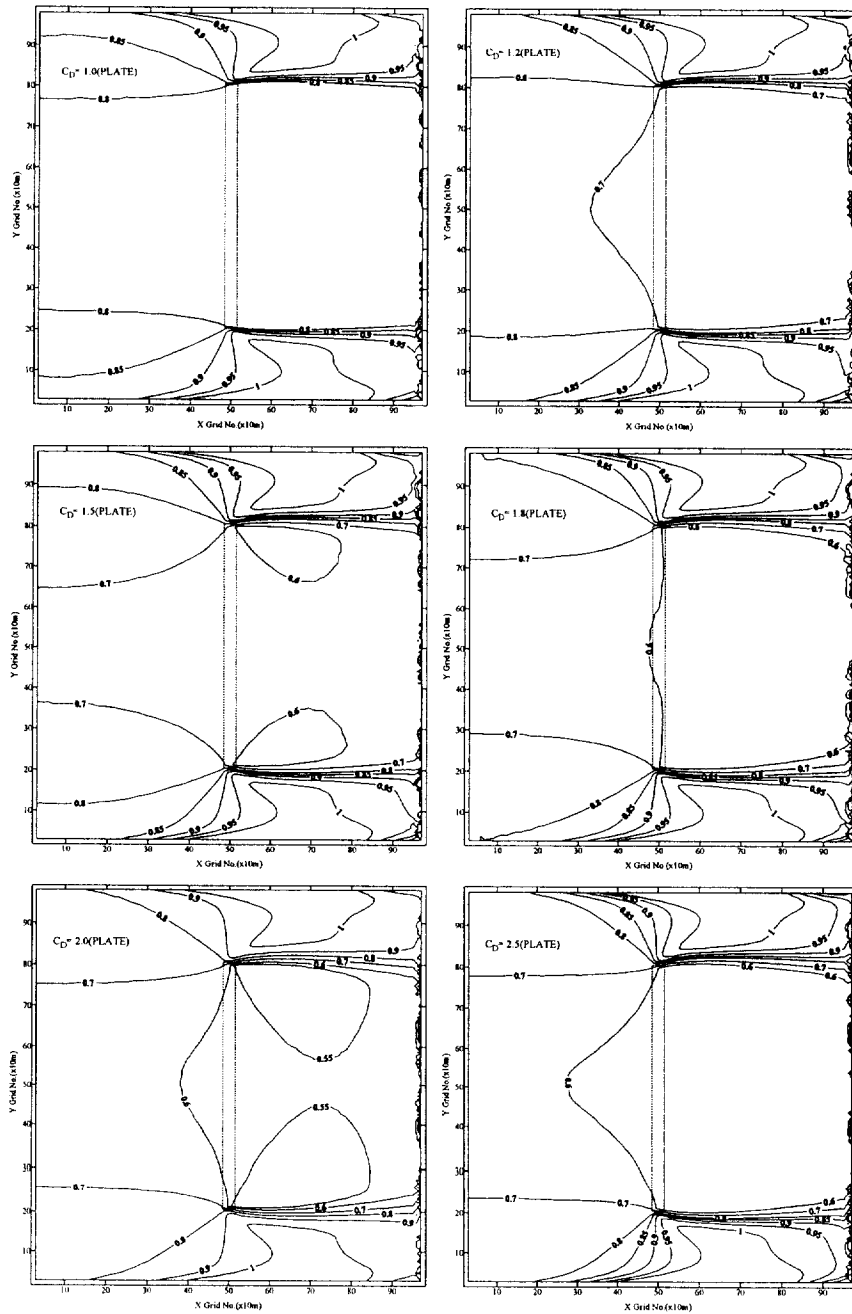


Fig. 3.29 The result of sensitivity analysis for the plate structures.

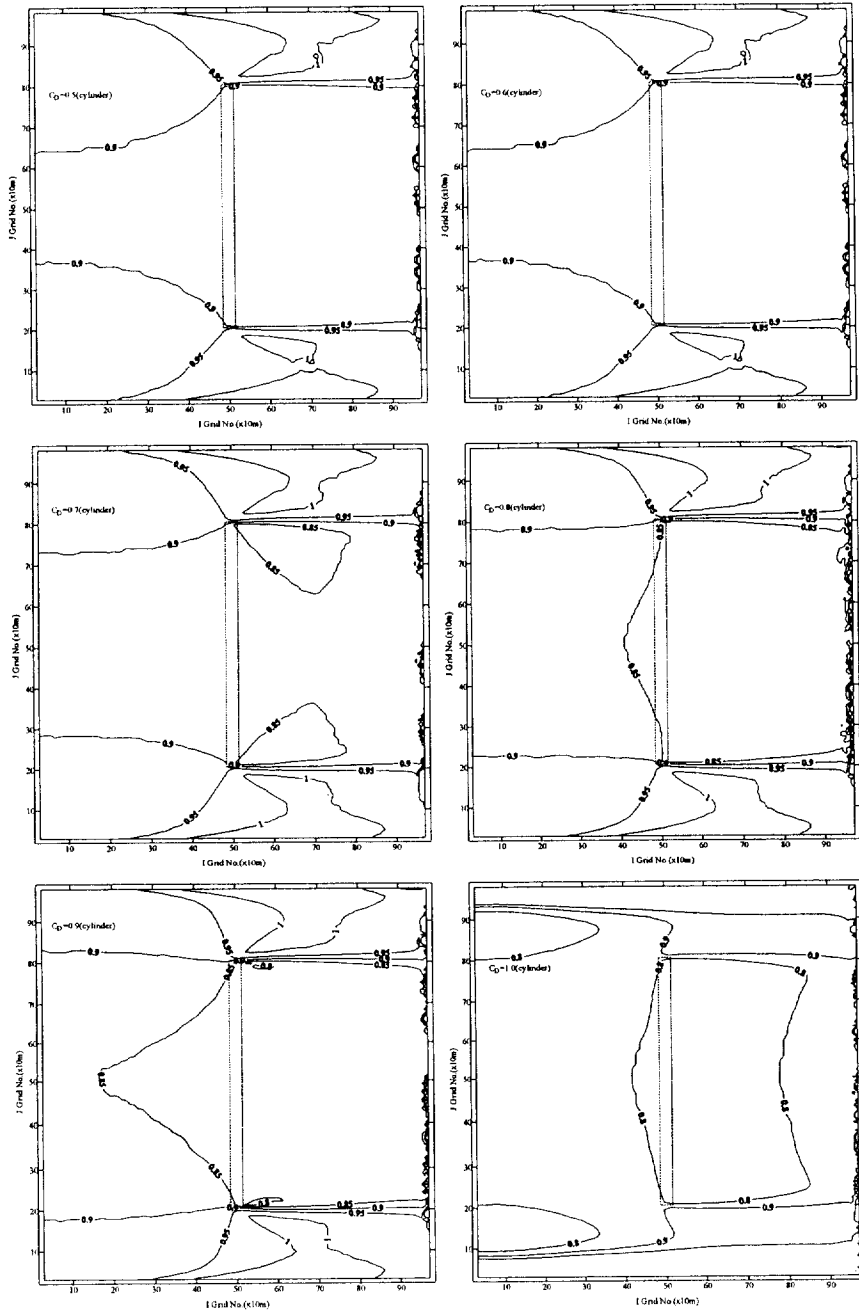


Fig. 3.30 The result of sensitivity analysis for the cylindrical pile.

3.4.2 수치계산조건

수치계산의 전체 계산영역 및 계산격자크기는 현상태 해수유동수치모형과 동일하고 돌제부두와 파제체에 투과식 구조물을 설치한 경우에 대하여 수치계산을 수행한다. 수심은 중력식 구조물 설치시와 비교하여 돌제부두와 파제체가 위치한 격자들을 투과성 격자로 처리하였다.

모형의 개경계 조건과 계산 파라미터들은 현상태해수유동시물레이션에 사용된 Table 3.1과 Table 3.2의 값들을 동일하게 사용하였다. 한편, 돌제부두와 파제체의 각각의 격자점에서 항력계수는 단일평판, 2열 평판 그리고 원주형 말뚝에 대하여 각각 2.0, 2.5, 0.8의 값을 사용하였다.

3.4.3 해수유동시물레이션 결과

전체 계산영역에서 투과식 구조물 설치시에 대조기의 해수유동계산결과를 나타낸 것은 그림 Fig. 3.31~3.32과 같다. Fig. 3.31은 현상태 대조기 창조류시와 동일한 계산시각에서 출력된 창조류 최강류시의 해수유동을 나타낸 벡터도이다. 그리고 Fig. 3.32는 낙조류 최강류시의 계산결과를 나타낸다. 한편 상세역에서의 해수유동패턴은 Fig. 3.33~3.34와 같이 나타내어 진다. 대안설계시 해수유동은 중력식 구조물의 배치시에 발생하는 파제체 외곽부의 유속 증가가 상당히 감소하는 특징을 보인다.

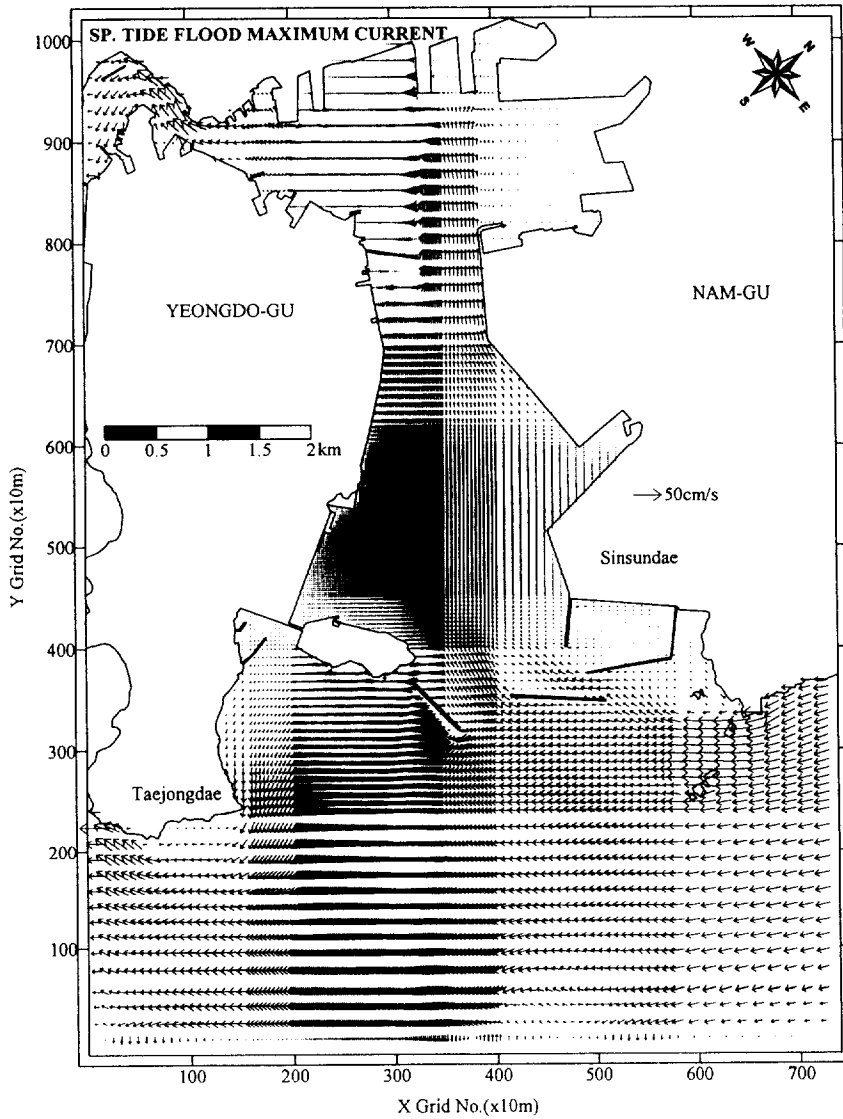


Fig. 3.31 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., pile type structures).

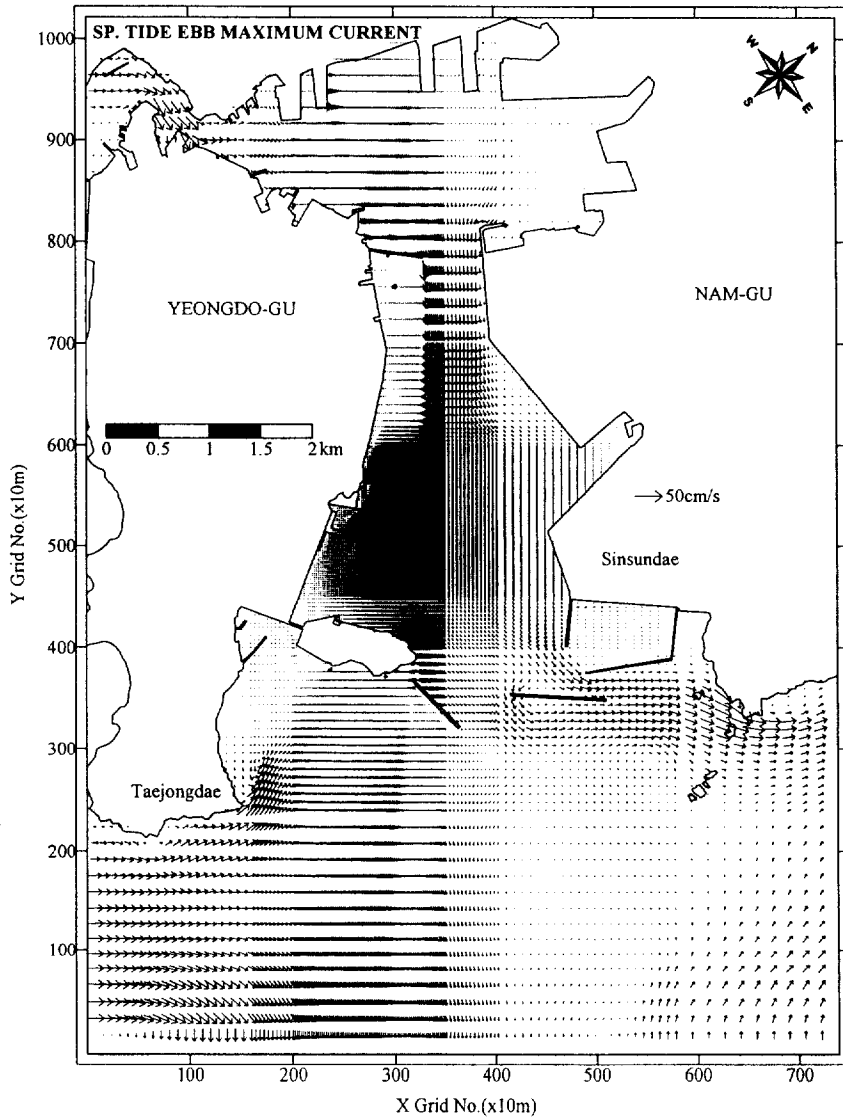


Fig. 3.32 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (ebb max., pile type structures).

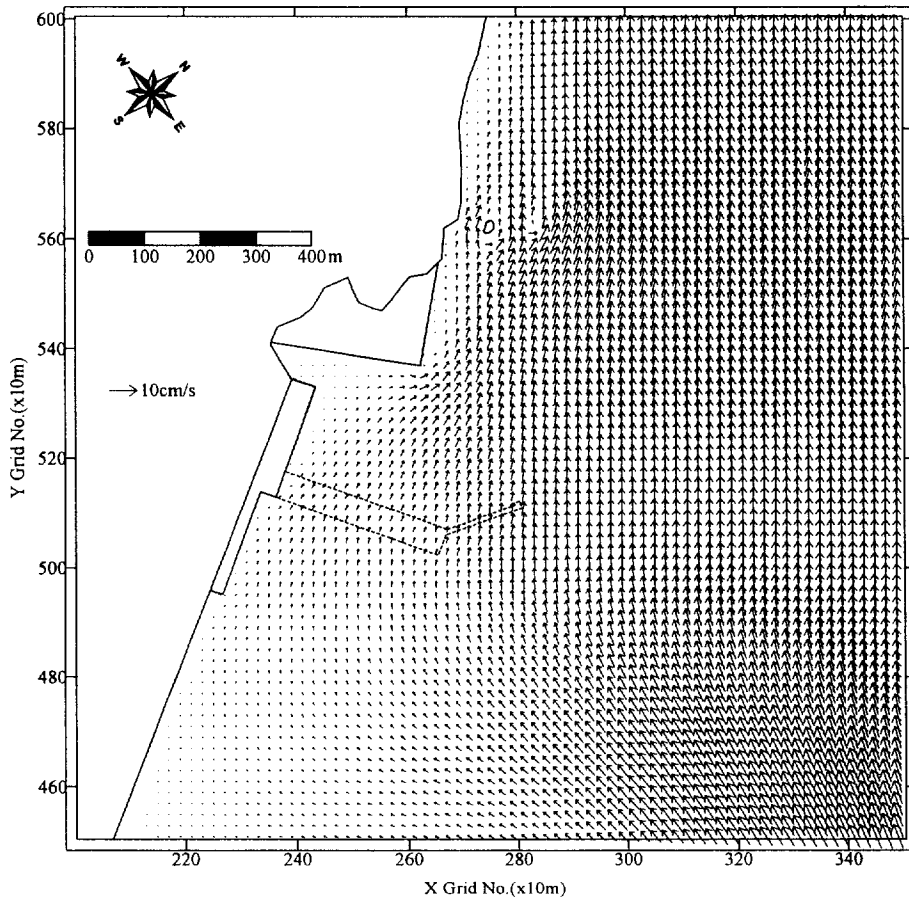


Fig. 3.33 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (flood max., detail region, pile type structures).

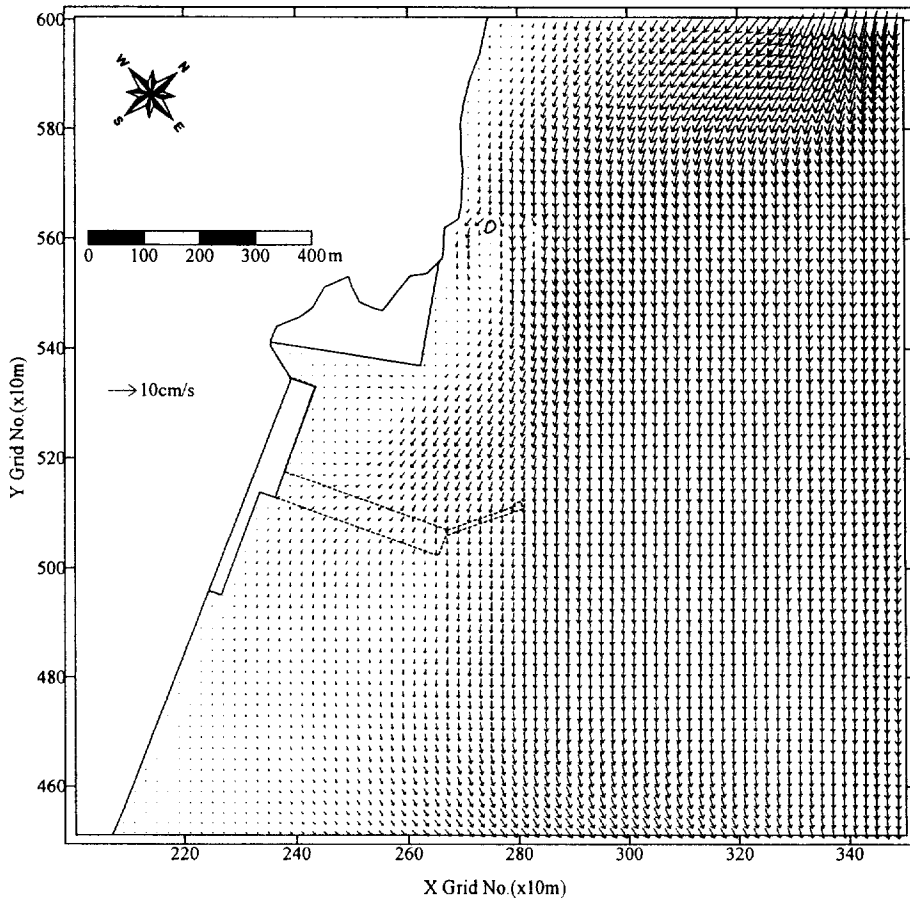


Fig. 3.34 Vector diagram of tidal currents during the spring tide (ebb max., detail region, pile type structures).

4. 중력식 구조물과 파일식 구조물 설치에 따른 수리현상 변화

4.1 해수유동변화량

해경부두건설, 해안매립 및 항로준설 후에 대상해역은 유속 및 유향의 변화를 나타낸다. 이러한 해수유동의 변화는 궁극적으로는 해역의 해양환경의 변화를 초래할 것으로 보여진다. 이러한 것을 나타내는 척도로서 건설후 해수유동변화량의 절대치는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{건설후의 유속변화량}(cm/s) = \text{건설후의유속} - \text{현상태의유속}$$

이러한 유속변화량의 절대치를 원안 및 대안설계 후의 대조기 창조류 및 낙조류 최강류시에 대하여 조사하였다.

4.1.1 중력식 구조물 설치시 대조기 유속변화량

중력식 구조물 설치시 대조기 창조류 최강류시와 낙조류 최강류시의 유속 변화량을 $\pm 1cm/s \sim \pm 5cm/s$ 까지 나타낸 그림은 Fig. 4.1 및 4.2와 같다.

창조류최강류시에 대상해역의 유속변화량은 파제제 외곽부에서는 유속의 증가가 최대 3 cm/s까지 나타나고 돌제부두 전면과 부두 내측 및 매립지 전면에서는 유속이 감소하는 경향을 보인다. 한편, 낙조류 최강류시에는 창조류 최강류시와 동일하게 파제제 외곽부에서는 유속이 증가하고 돌제부두 전면에서는 유속이 폭넓게 감소하는 것을 볼 수 있다.

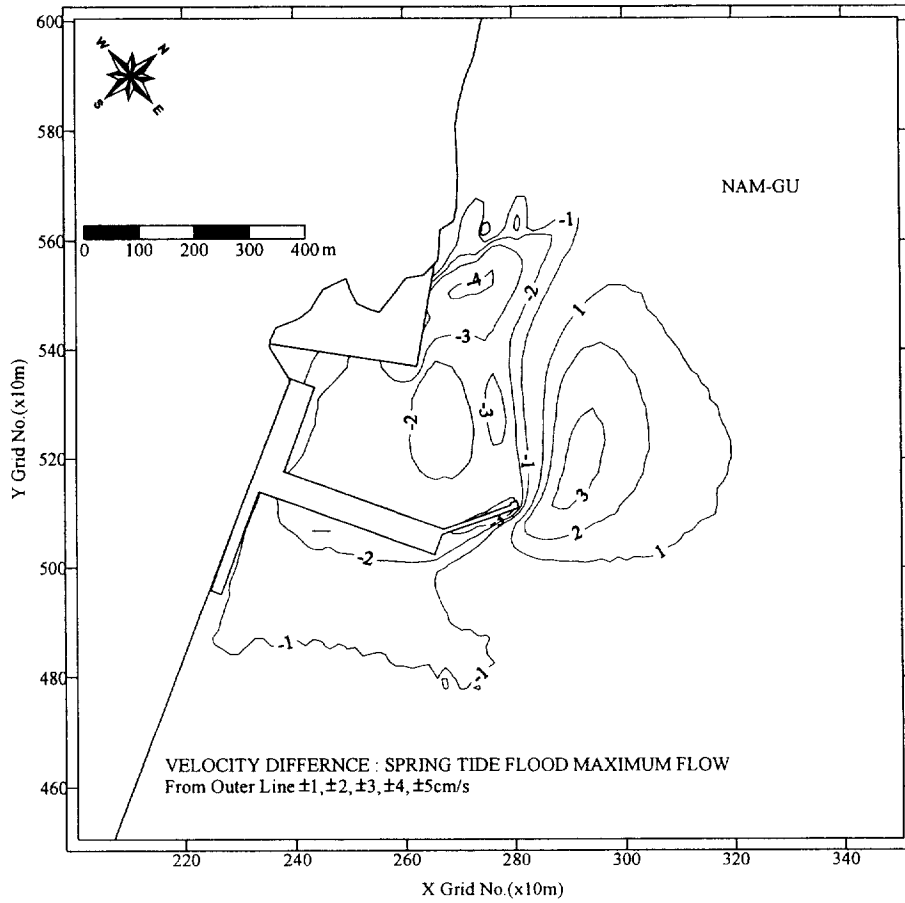


Fig. 4.1 Difference of tidal current in flood Max.(gravity type structure).

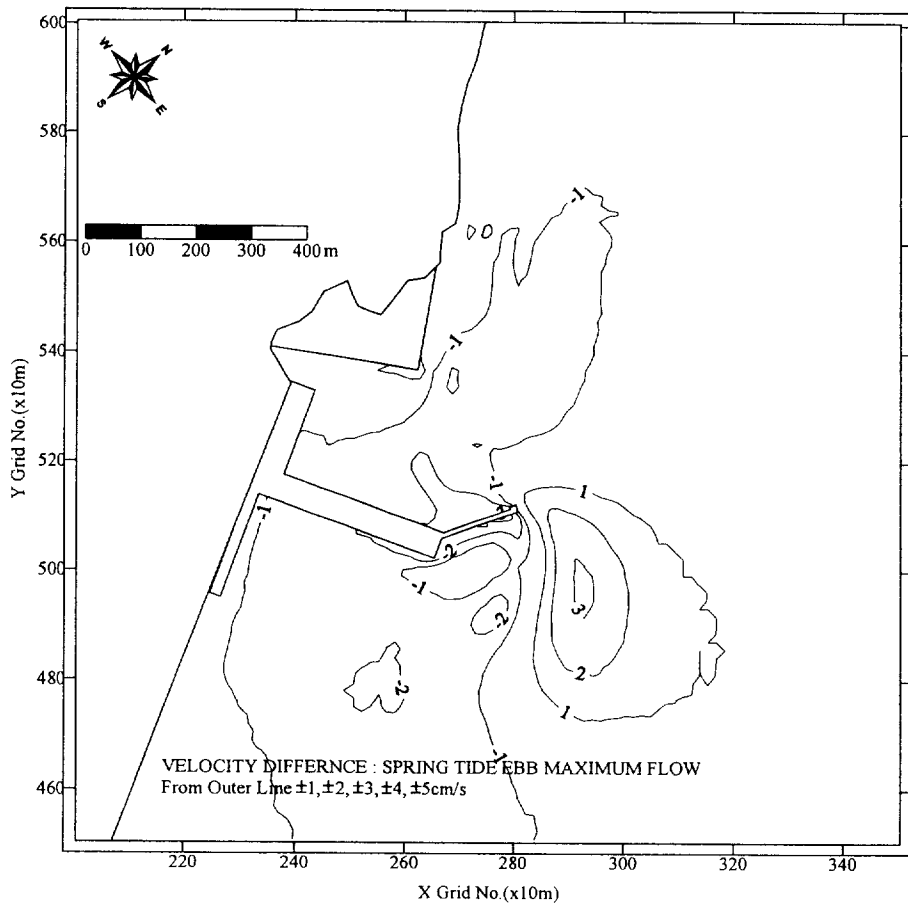


Fig. 4.2 Difference of tidal current in ebb Max.(gravity type structure).

4.1.2 파일식 구조물 설치시 대조기 유속변화량

파일식 구조물 설치시 대조기 창조류 최강류시와 낙조류 최강류시의 유속 변화량을 $\pm 0.5\text{cm/s} \sim \pm 5\text{cm/s}$ 까지 나타낸 그림은 Fig. 4.3~4.4와 같다.

창조류 최강류시에 대상해역의 유속변화량은 중력식 구조물설치시와 비교하여 파제제 외곽부에서는 유속의 증가량이 크게 감소하고, 돌제부두 전면과 돌제부두와 매립지 사이의 유속감소량도 크게 감소한다. 낙조류 최강류시에 는 돌제부두 전면을 따라 폭넓게 유속이 감소했던 원안에 비해 상대적으로 유속의 감소범위가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다.

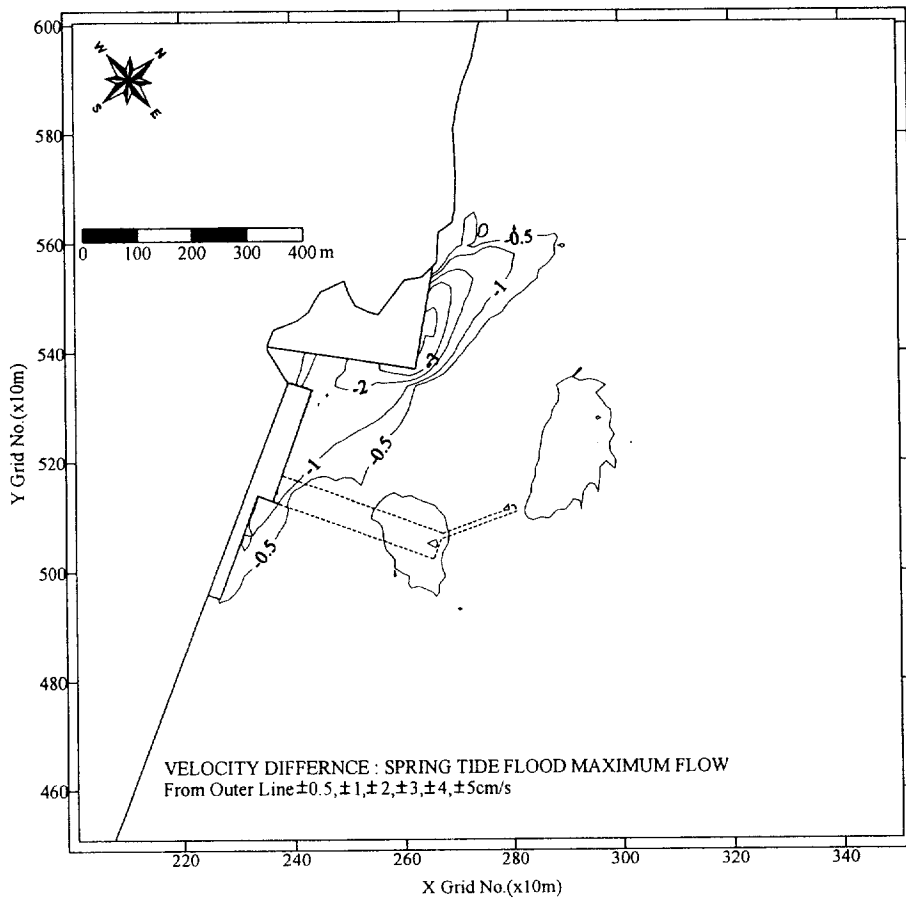


Fig. 4.3 Difference of tidal current in flood Max.(pile type structure).

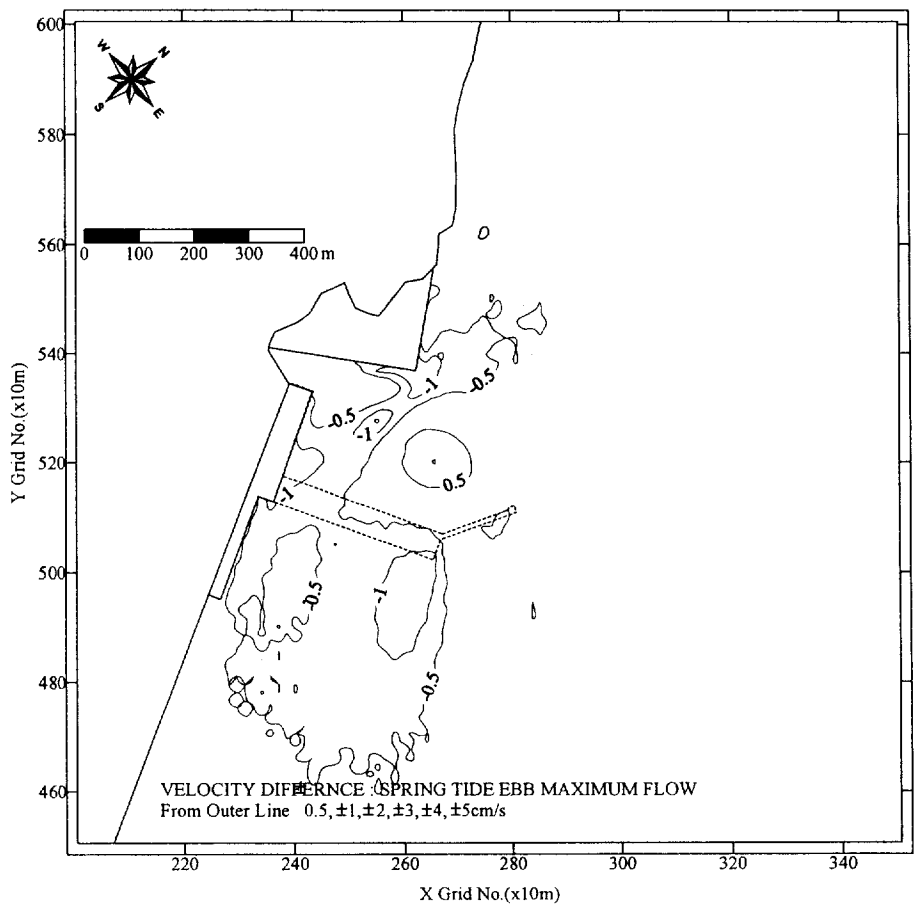


Fig. 4.4 Difference of tidal current in ebb Max.(pile type structure).

4.2 해수교환율 및 해수소통량 예측

해수교환율 및 해수소통량은 수질오염의 정도를 정성적으로 판단해 볼 수 있는 중요한 지표가 된다. 해경부두 건설지점의 해수교환율은 해수의 교란 및 이류에 따른 Lagrange적인 추적방법에 의하여 물질확산을 계산하는 입자추적방법을 이용한 RANDLEE(이 등, 1995)모형을 사용하였다. 해수교환은 조류 및 조석잔차류, 해빈류, 장주기성 파랑 등 다양한 유동성분의 복합작용에 의해 결정되지만 본 조사에서는 연안의 대표적 유동성분인 조류 및 조석잔차류에 의한 교환율을 산정하였다(이 등, 2001).

해수소통량은 사업지구 외곽의 두 단면에서 원안 및 대안설계후의 해수유동자료를 바탕으로 해수소통량의 경시변화를 구하였다.

4.2.1 해수교환율 예측

가. 수치모형의 개요

해수교환은 내만의 물질수지를 지배하는 중요한 요인의 하나로서 여러 사람에 의해 많은 연구가 수행되어 왔지만 해수교환이라는 용어는 사용하는 사람에 따라 의미가 달라지는 경우가 많았다.

Parker et al.(1972)은 조석교환계수라는 개념을 도입하여 다음과 같이 해수교환율을 정의하였다.

$$r_0 = \frac{q_0}{Q_F} = \frac{q_0}{q_0 + q_E} \quad (4.1)$$

즉, 창조류시 만내로 유입하는 해수의 체적 Q_F 중에서 처음으로 만내에 유입하는 외해수의 체적 q_0 가 차지하는 비율로 교환율을 정의한다.

창조류에 의한 유입량 Q_F 는 외양수 q_0 와 만으로부터 밖으로 나갔다가 창조류때 다시 만내로 되돌아오는 해수 q_E 로 이루어진다. 여기서, 지표 물질의 농도로서 염분을 사용하면 다음과 같다.

$$Q_F \overline{C_F} = q_0 C_0 + q_E \overline{C_E} \quad (4.2)$$

$$q_0 = r_0 Q_F \quad (4.3)$$

$$q_E = (1 - r_0) Q_F \quad (4.4)$$

$$r_0 = \frac{\overline{C_F} - \overline{C_E}}{C_0 - \overline{C_E}} \quad (4.5)$$

여기서, C_0 는 외양수의 염분이고, $\overline{C_F}$ 는 창조류시 만내유입수의 평균염분 그리고 $\overline{C_E}$ 는 낙조류시 만내유출수의 평균염분이다. 그러나 여기서 $\overline{C_F}$, $\overline{C_E}$ 를 구하기 위해서는 단면에 걸쳐서 적어도 1 조석주기 동안 유속과 염분의 연속관측이 필요하다.

中田와 平野(1976)은 실제해양에서 buoy의 방류에 대한 연구를 활발히 진행한바 있다. 그러나 여러 개의 float군의 동시추적을 현지해양에서 행하는 것은 상당한 어려움이 따르므로, 이 방법은 수치실험에서 이용하는 편이 여러 가지 면에서 편리하며 현재 많이 이용되고 있다. 수치계산에 있어서는 이미 얻어진 유속장에 여러 개의 표식입자를 투입해 그 궤적을 구해서 교환량을 평가하는 방법으로 다음과 같다.

$$E_V = \frac{V_{res}}{V_{max}} \quad (4.6)$$

여기서 V_{\max} 는 외해측으로 나간 내해수의 체적이 최대가 되었을 때이고, V_{res} 는 1 조석주기 후에 외해측에 남겨진 내해수의 체적이다. 그러나 여기서도 다수의 부이를 동시에 추적하여 V_{res} 를 구하는데 많은 어려움이 있으며, 이것은 해수의 체적교환율에 지나지 않으며 실제 오염물질의 교환을 나타내지는 못한다.

“체류시간(residence time)”이나 “교체시간(flushing time)”등을 이용해 대상으로 하는 해역전체의 해수교체 또는 교체의 용이함을 교체에 요하는 시간 scale로서 표현하려고 하는 경우(Yanagi, 1988)도 있었다. 武岡(1984)은 지금까지 비교적 애매하게 되어 있는 체류시간이나 치환시간 등의 교환에 관련된 시간 scale의 개념을 명확히 했다. 대상으로 하는 해역에서 $t=0$ 에 M_0 의 물질 혹은 해수가 존재하고, 이것이 교환의 과정으로 감소해서 시각 t 에 $M(t)$ 가 되었다고 하자. 武岡(1984)은 $r(t) = M(t)/M_0$ 를 잔여함수라 이름지었다. 이것은 확률분포함수의 일종으로 다음의 성질을 가지고 있다.

$$r(0) = 1, \quad r(\infty) = 0 \quad (4.7)$$

한편, $-dM(t)/dt$ 는 시각 t 의 단위시간으로 해역에서 유출해 가는 물질량을 나타낸다. 武岡은 어떤시각($t=0$)에 해역에 존재하는 물질입자가 해역으로부터 나가는데 걸리는 시간을 그 물질의 체류시간이라 정의하였다. 따라서

$$\phi(\tau) = -M_0^{-1}dM/d\tau = -dr/d\tau \quad (4.8)$$

$$\int_0^{\infty} \phi(\tau) d\tau = 1, \quad \phi(\infty) = 0 \quad (4.9)$$

로 정의되는 함수 $\phi(\tau)$ 는 체류시간 τ 를 가지는 물질입자의 비율을 나타내고, 체류분포함수라고 이름붙였다. 이때 평균체류시간은 식 (4.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_r = \int_0^{\infty} \tau \phi(\tau) d\tau = - \int_0^{\infty} \tau \cdot dr/d\tau \cdot d\tau = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (4.10)$$

따라서 잔류함수를 안다면, 평균체류시간을 구할 수 있다. 그러나 이 방법도 현장에서 만내유입물질의 장기간의 측정이 우선되어야 하므로, 실용상의 문제를 안고 있다.

Yanagi 등(1985)은 다음과 같은 방법으로 해수교환율을 산정하였다.

$$\alpha = \Delta S \cdot Q / \phi \quad (4.11)$$

여기서, α 는 만내수 전체의 해수교환율이고, ϕ 는 만내의 염분량 (ton/month), ΔS 는 인접한 만과의 평균염분차(%) 그리고 Q 는 인접한 만과의 1개월간의 해수교환량 ($m^3/month$)이다. 그러나, 이 방법 역시 식(2.7)의 우변을 구하는데 많은 오차가 따를 것으로 본다.

소내만에서는 만구의 폭이 좁고 선박의 출입이 빈번하여 만구에서 유속과 염분의 연속측정이 사실상 불가능하기 때문에 보다 간편하고 실용적인 교환율의 선정방법을 필요로 한다. Fig. 4.5는 일정수심의 단순한 지형을 가지는 모형수조에 반일주조류가 유입해오는 경우의 수치실험에

서 수평 2차원의 조류장을 가정하였다. 2개의 해역으로 나뉘는 좁은 수로부에 경계를 설정해서 개경계를 포함한 쪽이 외해측 해역, 반대편을 내만측이라 하여 앞에서 정의한 해수교환율 산정방법과 체류시간에 대하여 나타낸 그림이다.

기존의 해수교환율 산정방법은 현장조사에 많은 것을 의존하고 있다. 그러나, 현장조사에 의하여 해수교환율을 정의하는데는 많은 어려움이 따르기 때문에 정량적인 평가에 있어서는 커다란 진전을 보지 못하고 있는 실정이다.

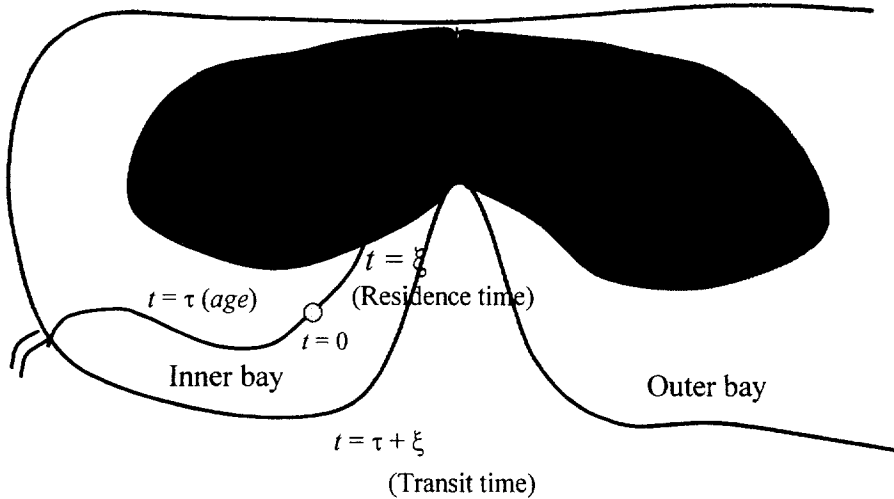


Fig. 4.5 Schematic view of tidal exchange ratio and residence time.

해수교환은 여러 가지 기구가 작용하여 나타나는 현상으로서 해양의 수질오염문제를 해석하고 제어하는데 대단히 중요한 사항이다. 따라서, 그 교환의 정도를 하나의 수치로 표현하면 편리한데 해수교환율, 조석교환율이라 부르는 것이 그 예로서 앞에서 정의된 것과 같은 여러 가지 방법이 제안되어 왔다. 해양에서 오염물질은 조석주기에 따라 주기적인

운동을 하기 때문에 물질교환은 조석주기에 대하여 검토하는 것이 일반적이다. 조류는 왕복류이지만 해수의 전입자가 단순한 왕복운동을 해서 1 조석주기 후에 원래 출발점으로 돌아오는 것이 아니라 순 이송(net transport)을 가져온다. 어떤 한 점에서 조류를 1 조석주기에 대하여 적분하면 유한한 크기와 방향을 갖는 흐름성분을 얻게 되는데 이것을 잔차류(residual flow)라고 부른다. 따라서 조석과 같은 왕복류에서 항만의 해수교환율에 직접적으로 영향을 미치는 흐름은 잔차류가 된다. 그 결과로서 1 조석주기후 또는 m 조석주기후의 만전체 또는 특정부분의 평균농도의 변화율이 해수교환율이 된다. 이와 같이 해수교환의 개념은 Lagrange적인 물질수송에 바탕을 두고 있으므로, 입자추적모형에 의하여 해수교환을 산정하는 것이 바람직하다고 할 수 있을 것이다.

① 1 조석후의 만전체 해수교환율

오염물질이 만내에 투입되고 나서 m 조석 후 만전체의 평균농도 \bar{C}^m 은 다음과 같다.

$$\bar{C}^m = \left(\frac{\sum Q_p}{V_{tot}} \right)^m = \left(\frac{q_p \cdot N_{tot}}{V_{tot}} \right)^m \quad (4.12)$$

여기서, q_p 는 입자 1개의 오염부하량(g/ea), N_{tot} 은 만내에 존재하는 입자의 총수 그리고 V_{tot} 는 만내 해수의 체적이다.

m 조석후 만전체의 해수교환율 R^m 은 만내의 평균농도변화율과 같아야 하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R^m = 1 - \frac{(q_p \cdot N_{tot} / V_{tot})^m}{(q_p \cdot N_{tot} / V_{tot})^{m-1}} \quad (4.13)$$

q_p 가 시간에 따라 일정하고, 만내의 해수용적이 일정하면 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$R^m = 1 - \frac{N_{tot}^m}{N_{tot}^{m-1}} \quad (4.14)$$

② m 조석후의 만전체 해수교환율

m 조석 후 만전체의 해수교환율을 초기의 만내 평균농도 N_{tot}^0 에 대한 해수교환율로서 정의하면 R_0^m 은 다음과 같다.

$$R_0^m = 1 - \frac{N_{tot}^m \cdot V_{tot}^0}{N_{tot}^0 \cdot V_{tot}^m} = 1 - \frac{N_{tot}^m}{N_{tot}^0} \quad (4.15)$$

앞에서 정의한 잔여함수 $r(m) = N_{tot}^m / N_{tot}^0$ 을 사용하여 식을 다시 쓰면 $R_0^m = 1 - \int r(m) dm$ 가 되어 만전체의 평균해수교환율과 평균체류시간의 합은 1.0이 된다.

③ 각 격자당 m 조석후의 해수교환율

검사체적 V_{ij} (각 격자)당 m 조석후의 해수교환율 R_{0ij}^m 은 다음과 같이 정의된다.

$$R_{0ij}^m = 1 - \frac{N_{ij}^m}{N_{ij}^0} \frac{V_{ij}^0}{V_{ij}^m} \quad (4.16)$$

각 격자의 해수용적이 일정하면 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$R_{ij}^m = 1 - \frac{N_{ij}^m}{N_{ij}^0} \quad (4.17)$$

여기서, V_{ij} 는 격자 1개의 체적인 $(\Delta X \cdot \Delta Y \cdot h)_{ij}$ 이고 N_{ij} 는 격자 1개에 존재하는 입자의 총수이다.

같은 방법으로 각 격자 당 1 조석후의 해수교환율을 나타내면 다음과 같다.

$$R_{ij}^m = 1 - \frac{N_{ij}^m}{N_{ij}^{m-1}} \quad (4.18)$$

④. m 조석후의 만입구의 국부적인 해수교환율

m 조석후 만입구의 국부적인 해수교환율을 식(4.6)과 같이 정의하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_V^m = \left(\frac{N_E - N_F}{N_E} \right)^m \quad (4.19)$$

여기서, N_E 은 낙조류시 만구를 통하여 빠져나간 입자의 갯수이고 N_F 는 창조류시 만구를 통하여 유입한 입자의 갯수이다. 식 (4.19)는 中田와

平野(1976)의 정의에 의한 해수교환율과 유사한 식이다.

본 수치모형실험에서는 돌제부두 및 파제제의 설치로 인한 대상해역의 일정수괴 전체에서 m 조석후 해수교환율을 식 (4.15)와 같이 정의하여 검토하였다.

나. 입자추적방법

해수교환율을 산정하기 위하여 Lagrange적인 추적방법에 의하여 물질확산을 계산하는 Random Walk방법을 이용한 RNDLEE모형을 사용하였다. RNDLEE 모형의 구성을 살펴보면 다음과 같다.

흐름장에 놓여진 입자가 passive contaminant인 경우 시간 $t + \Delta t$ 에서 입자의 새로운 위치 $X(t + \Delta t)$ 는 표류속도벡터 U 와 분산속도성분 u' 에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$X(t + \Delta t) = X(t) + U \cdot \Delta t + u' \cdot \Delta t \quad (4.20)$$

식 (4.20)에서 우변 제 3항은 분산에 의하여 입자가 이동하는 것을 나타내는 것으로서 확률과정론적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u' \cdot \Delta t = R \cdot \sigma \quad (4.21)$$

$$\sigma = \sqrt{2\alpha_L |u'(X(t), t)| \cdot \Delta t} \quad (4.22)$$

여기서, R 은 평균치 0, 표준편차 1인 정규분포로서 식 (4.21)과 식 (4.22)는 이류항을 무시한 확산방정식의 기본해와 일치한다.

한편, 식 (4.22)에 따르는 확률과정에서는 개개의 입자의 집합에 관한 시공간적 확률분포 $C(x, y, t)$ 는 다음과 같은 Fokker-Plank 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{\partial^2(D_{xx}C)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(D_{xy}C)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2(D_{yy}C)}{\partial y^2} \quad (4.23)$$

$$U = u + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.24)$$

$$V = v + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x} + \frac{D_{yy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{D_{xy}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.25)$$

$$D_{xx} = D_L \cos^2 \theta + D_T \sin^2 \theta \quad (4.26)$$

$$D_{yy} = D_L \sin^2 \theta + D_T \cos^2 \theta \quad (4.27)$$

$$D_{xy} = (D_L - D_T) \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.28)$$

여기서, $\theta = \text{atan}(v/u)$, D_L 및 D_T 는 각각 흐름방향의 종분산계수 및 흐름과 직각방향의 횡분산계수로서 식 (4.29)와 같다.

$$D_L = \alpha_L | u'(x(t), t) | \quad (4.29)$$

여기서, α_L 은 혼합거리이다.

분산은 난류확산에 있어서 연직방향의 속도분포로 인한 걸보기 확산을 고려한 것으로서 Elder는 2차원 개수로에서 식 (4.30)와 같이 구하였다.

$$D_L = 5.93 h U_* \quad (4.30)$$

여기서, h 는 수심, U_* 는 마찰속도로서 식 (4.31)과 같이 구할 수 있다.

$$U_* = \frac{\sqrt{g}}{C} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.31)$$

$$C = -18.0 \log(k/12h) \quad (4.32)$$

단, g 는 중력가속도, C 는 chezy의 저항계수, k 는 조도높이임.

일반적으로 횡분산계수 D_T 는 종분산계수 D_L 의 약 1/4정도의 값을 취한다. 식 (4.21)과 식 (4.22)에서 분산에 의한 속도성분 u' 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$u_L' = R_1(2D_L / \Delta t)^{1/2} \quad (4.33)$$

$$u_T' = R_2(2D_T / \Delta t)^{1/2} \quad (4.34)$$

여기서, R_1 과 R_2 는 평균치 0, 표준편차 1의 정규분포를 갖는 난수이고, 분산속도의 x 및 y 방향의 성분은 다음과 같이 된다.

$$u' = u_L' \cos \theta - u_T' \sin \theta \quad (4.35)$$

$$v' = u_L' \sin \theta + u_T' \cos \theta \quad (4.36)$$

Lagrange적인 입자추적모형에서 격자점 (i, j) 에서 농도 C_{ij} 는 식 (4.37)과 같이 나타내어진다.

$$C_{ij}(t) = \frac{M}{N} \frac{n_{ij}(t)}{h_{ij} \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \quad (4.37)$$

여기서, M 은 오염물질의 총 질량, N 은 투입된 총 입자수, n_{ij} 는 격자 (i, j)내에 있는 입자수, h_{ij} 는 수심 그리고 $m = M/N$ 즉, 1개 입자당 오염물질의 양이다.

해수교환율의 산정은 전술한 입자추적방법에 의하여 이루어 졌으며, 단순히 해수교환율만을 산정하기 위하여 입자는 염분과 같은 보전성 물질로 가정하였으며 입자의 감쇠계수는 없는 것으로 하여 해수교환율을 산정하였다.

다. 해수교환율 산정절차

해수교환율은 다음과 같은 과정으로 산정한다.

- 대상영역(항내수역 그림 4.6)의 각 격자점마다 수십개씩 입자를 투입한 후에 전술 입자추적방법에 따라 임의 시간동안 각 입자의 과거 위치를 산정한다.
- 임의 시간 경과 후 각 투입점의 입자 중 항내와 항외에 위치하는 입자수를 파악하고 그 결과로부터 해수교환율을 산정한다.
- 계산종료시간까지 반복 계산한다.

라. 수치모형 실험조건

① 유동조건

해수교환작용의 지배적인 유동인 조류와 조석잔차류에 대하여 조류는 난류적인 유동으로 가정하여 수립자의 교란(난류적 분산)을 평가하는데

사용되고 조석잔차류는 평균류로 가정하여 수립자의 이류를 평가하는데 사용된다. 조류와 조석잔차류는 전술한 불투과성 구조물이 존재하는 원안설계상와 투과성구조물이 존재하는 대안설계시의 각각의 경우에 해수 유동실험에서 얻어진 자료를 사용하였다.

② 입자투하조건

해수교환 검토구역인 그림 4.6의 사선이 있는 구역내의 각 격자점마다 수치적 입자를 10개씩 배치하였다.

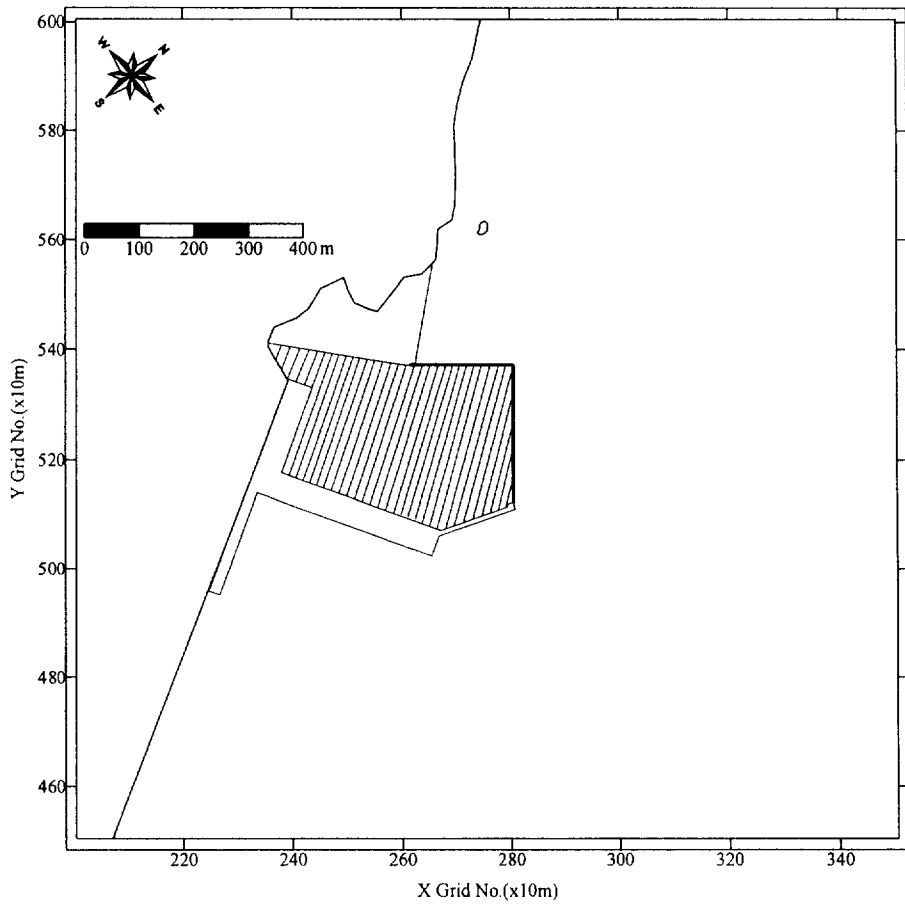


Fig. 4.6 Region of particle release.

마. 해수교환율 예측결과

① 중력식 구조물 설치시의 해수교환율

해경부두축조 공사에 따른 항내 해수교환능을 검토하기 위하여 해수유동 모형으로부터 계산된 중력식 구조물 설치후의 유동자료(조류 및 조석잔차류)를 바탕으로 한 입자추적실험에 의하여 대상수역내의 평균 해수교환율을 산정하였다. 입자추적실험으로부터 산정된 평균 해수교환율의 경시변화를 Fig. 4.7에 제시하였는데, 4조석주기 경과후의 항내 평균 해수교환율은 90%를 넘는 것으로 나타났다. 이와 같은 해수교환율은 항내 수역 전체를 대상으로 한 평균적인 개념으로서 항내 국부적으로 보면 교환율의 차이는 다소 있을 것이다.

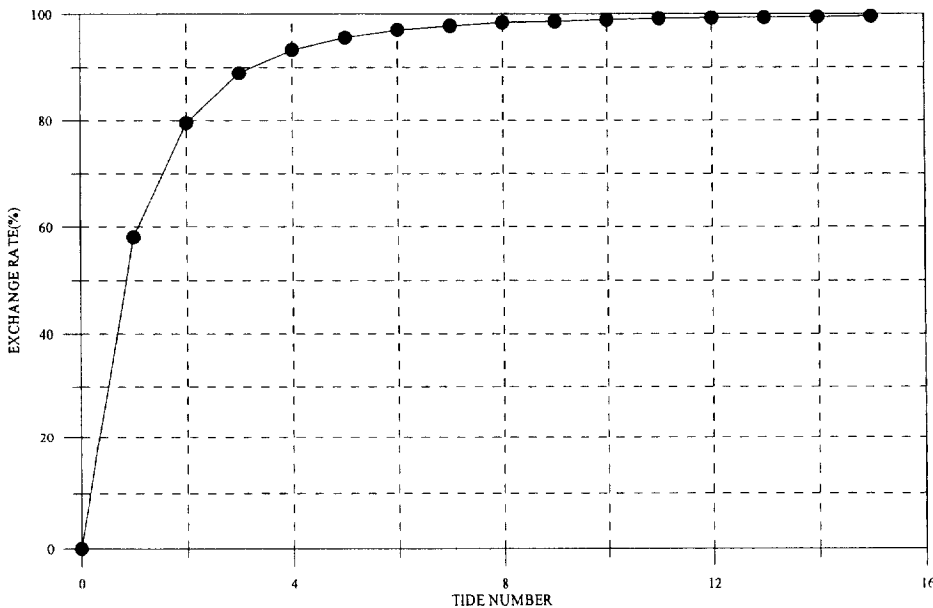


Fig. 4.7 Water exchange rate variation each tidal periods (gravity type structures).

② 파일식 구조물 설치시의 해수교환율

파일식 구조물 설치시의 해수교환율은 중력식 구조물설치시와 동일한 방법으로 동일한 격자점에서 동일한 입자를 투하하여 해수교환율을 산정하였다.

Fig. 4.8은 파일식 구조물 설치시의 항내 평균해수교환율의 경시변화를 나타낸 곡선이다. 이러한 파일식 구조물의 설치시에는 구조물의 투과성으로 인하여 불투과성 구조물을 설치하였을 경우보다 항내 해수의 교환이 활발해져서 2조석주기 후에 대상해역내 평균해수교환율은 90% 이상 교환되는 것을 볼 수 있다.

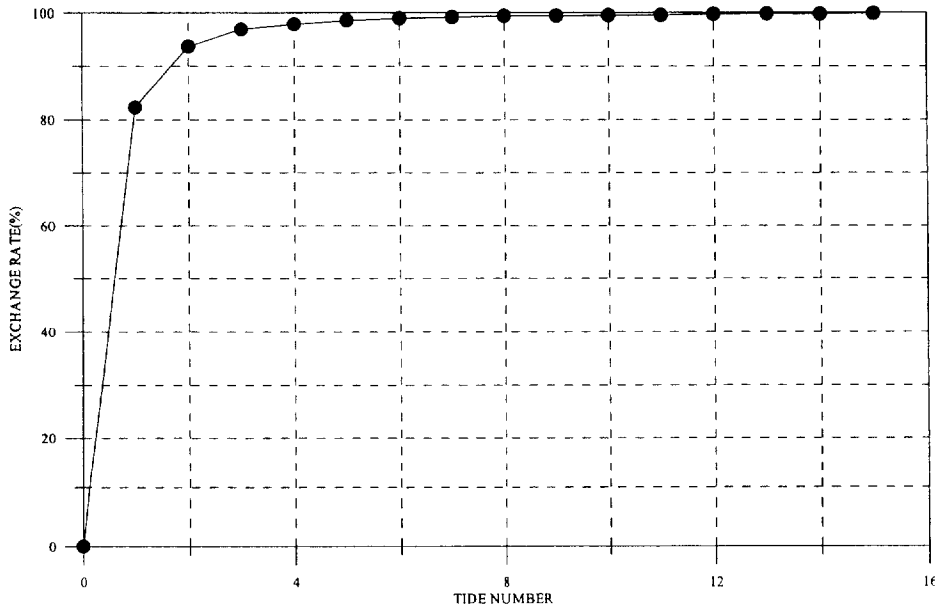


Fig. 4.8 Water exchange rate variation each tidal periods (pile type structures).

4.2.2 해수소통량 예측

중력식 구조물 및 파일식 구조물 설치에 따른 사업지구의 해수소통량을 평가하기 위하여 Fig. 4.9의 A, B 단면에서 대조기 25시간동안의 해수소통량의 경시변화를 구하였다.

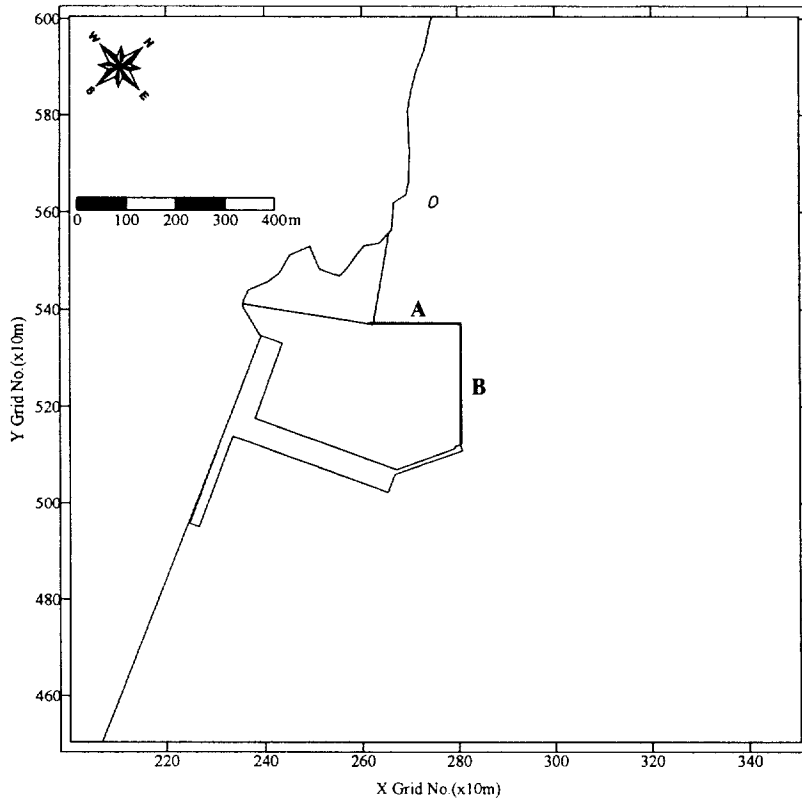


Fig. 4.9 Section position to the sea water transport capacity.

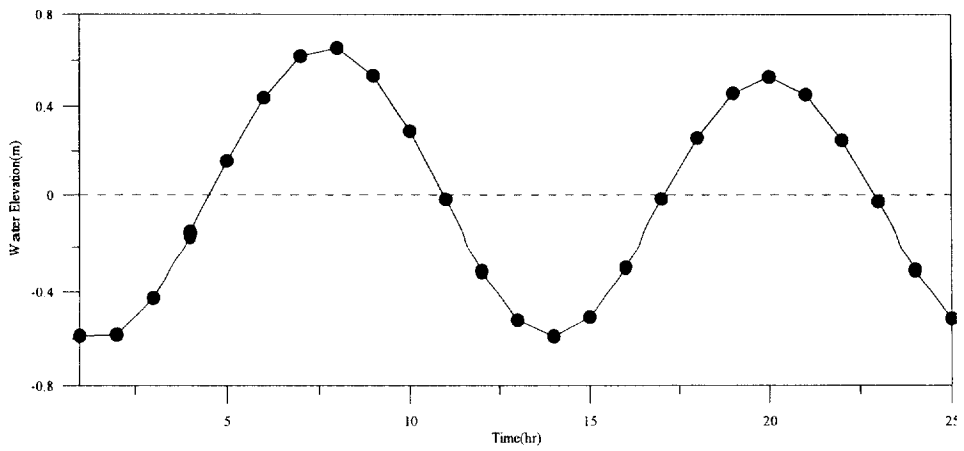


Fig. 4.10 Variation of tidal amplitude during 25 hours (spring tide).

가. A 단면에서의 해수소통량

사업지구 북서쪽의 A 단면에서의 대조기 25시간 동안 해수소통의 경시변화는 Fig. 4.11과 같다. 한편, Fig. 4.10은 Fig. 4.11의 시간에 대응하는 수위의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 4.11에서 나타난 (-)의 값은 유입수피를 의미하고, (+)는 유출수피를 의미한다. 해수소통량은 창조시 유출하고 낙조시 유입하는 변화추이를 잘 재현하고 있고, 파일식 구조물의 설치시에는 구조물의 투과성으로 인해서 중력식 구조물 설치시 보다 창조시 해수소통이 더욱 원활해짐을 볼 수 있다.

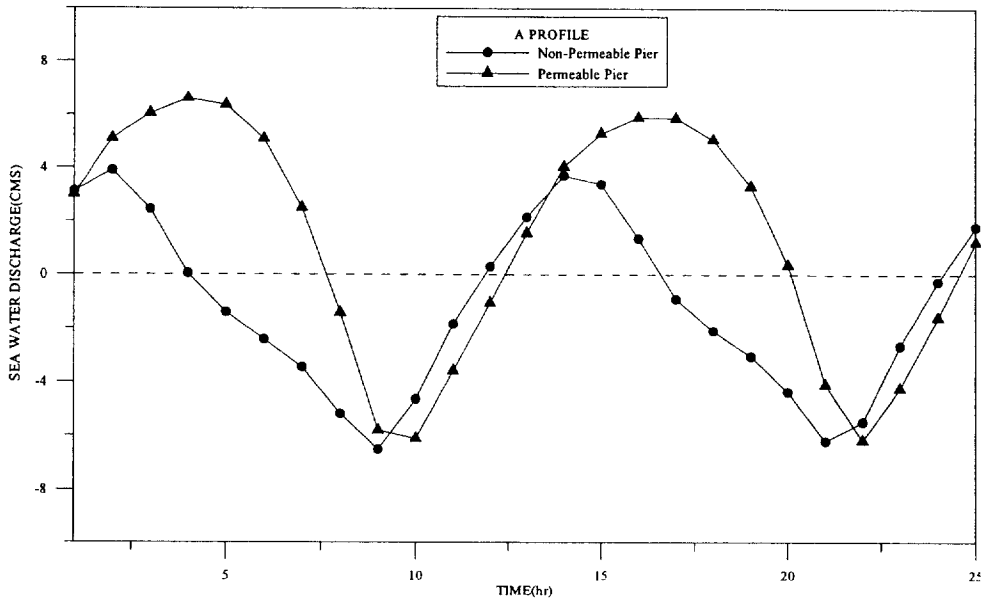


Fig. 4.11 Time variation of sea water transport capacity in section A.

나. B 단면에서의 해수소통량

그림 3.8은 그림 3.5의 B단면에서의 해수소통량의 경시변화이다. 그림에서 (-)의 값은 항내수역으로 유입하는 수괴를 의미하고 (+)는 유출함을 나타낸다. 중력식 및 파일식 구조물의 설치시의 경시변화는 A 단면과는 상이하게 서로 상반되는 특징을 보여 파일식 구조물 설치시는 창조시 대상수괴 밖으로 유출하고 낙조시에는 유입하는 경시변화를 보이나, 중력식 구조물 설치시에는 창조시에 대상해역으로 유입하고 낙조시 유출하는 형태를 띤다. 이는 파일식 구조물을 설치하는 경우에 창조시 구조물의 투과성으로 인하여 B단면의 하부측에서 유입하는 흐름성분이 존재하나, 불투과성 구조물이 존재하는 중력식 구조물의 경우에는 파제제 외곽부의 흐름이 강해져서, 항내수역으로 유입하는 성분이 존재하기 때문이다. 해수소통량의 크기는 중력식 구조물 설치시에 더 크게 나타난다.

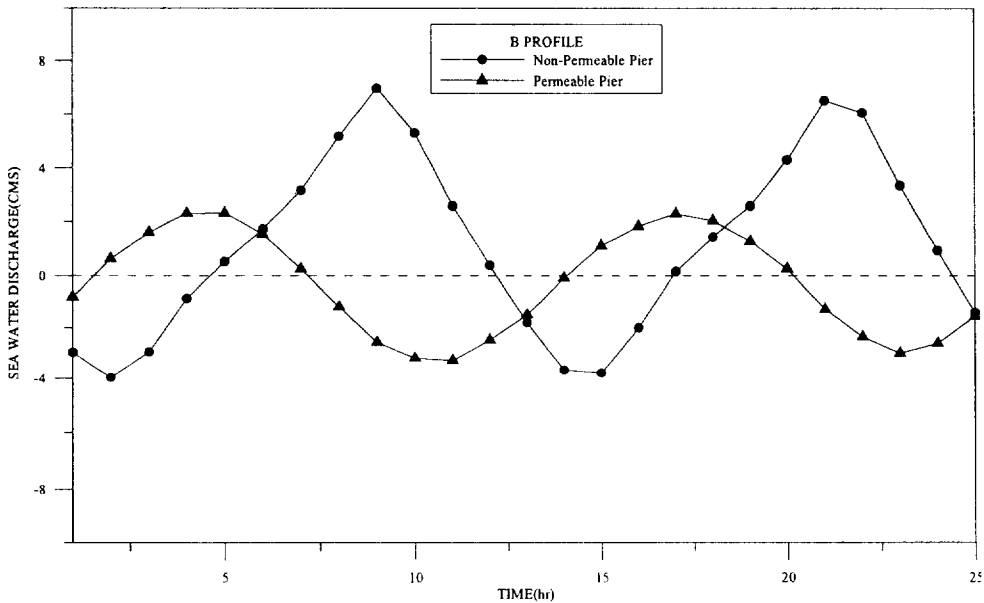


Fig. 4.12 Time variation of sea water transport capacity in section B.

5. 요약 및 결론

현재 다양한 해안구조물에 요구되어 지고 있는 친환경성 파일식 구조물 설치에 따른 수리현상의 변화를 알아보기 위해서 대상해역인 해경부두 부근의 해수유동 수치모형을 통하여 해수유동을 재현하고, 중력식 구조물 및 파일식 투과성 구조물의 설치로 인한 해수유동변화, 해수교환율, 해수소통량 등을 계산하였다. 현상태의 해수유동모형은 기존의 관측자료와 잘 일치함을 보여주었고, 창조시 북서(NW)방향으로 유입하고, 낙조시 남동(SE)방향으로 유출하는 패턴을 잘 재현하였다. 중력식 구조물이 존재하는 경우에 해수유동 변화는 창·낙조시 항내에서는 유속이 감소하고 파제제 외곽부에서 유속의 증가가 나타나는 특징을 보인다. 한편, 돌제부두와 파제제에 투과성 구조물이 존재하는 경우에는 돌제부두와 파제제의 각 격자점에서 존재하는 구조물의 형상과 배치를 고려하여 각각의 격자점에서 항력계수를 산정하여 수치시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 대상해역의 해수유동변화는 불투과성 구조물이 존재하는 경우와 비교하여 크게 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

대상해역의 해수교환율은 중력식 구조물의 경우 4 조석주기 후에 약 90%의 해수교환이 이루어지는데 반해서 파일식 구조물의 경우에는 2 조석주기 후에 90%의 해수교환이 이루어져서 해수교환이 매우 원활해짐을 볼 수 있었다.

중력식 구조물과 파일식 구조물을 설치한 경우에 해수소통량은 돌제부두와 나란한 북서방향에 존재하는 A단면의 경우에는 파일식 구조물 설치시에 해수소통량이 더욱 증대되는 것을 보여주었다.

중력식 구조물과 파일식 구조물이 설치된 경우의 해수유동변화와 해수교환율 및 해수소통량을 비교해 볼 때 전반적으로 돌제부두와 파제제에 불투과성 구조물을 설치한 경우에 해수유동변화량이 줄어들고 해수교환이 원활

하게 이루어져서 파일식 투과성 구조물을 설치하는 것이 해수유동변화를 최소화하고 해수교환율을 크게 증대시키는 효과적인 구조형식임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 박일흠, 이종섭, 이문옥 (1998). “저항물체 배후의 이차원 후류에 관한 대 격자 수치모형,” 한국해안·해양공학회지, 10(2), 83-92.
- 이종섭, 김호진 (1995). “Random Walk 모형에 의한 확산해의 민감도해 석,” 대한토목학회논문집, 15(5), 1267-1277.
- 김호진 (1996). “Random Walk 모형에 의한 내만의 해수교환능 평가,” 공학석사 학위논문, 부산수산대학교, 해양공학과, 34-35.
- 이종섭, 박일흠 (1995). “수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수 치모형,” 한국수산학회지, 28(5), 607-623.
- 이종섭, 주귀홍, 이왕관 (2001). “입자추적모형에 의한 해수교환을 산정방법,” 대한토목학회논문집, 21(6B), 619-632.
- Falconer, R.A (1986). “A two-dimensional mathematical model study of the nitrate levels in an inland natural basin,” Proc. Inter. Conf. Water Quality Modellings in the Inland Natural Environ., BHRA, Fluid Engineering, Bournemouth, Paper J1, 325-344.
- Frank M. White (2002). Fluid Mechanics. MaGraw HILL, 476-486.
- Akitomo, K. (1988). “A numerical study of a shallow sea front generated by the bouyancy flux,” Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol. 44, 171-188.
- Awaji, T., Imasato, N., and Kunishi, H. (1980). “Tidal exchange through a strait : A numerical experiment using a simple model basin,” Journal of Physical Oceanography, Vol. 10, 1499-1508.
- Elder, J.W. (1959). “The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow,” J. Fluid Mesh, Vol. 5, 544-560.

Holly, F.M. Jr. and Pressmann, A. (1977). "Accurate calculation of transport in two dimension," J. Hydraul. Div., Proc. ASCE, Vol. 103, No. HY II, 1259-1277.

감사의 글

부족한 저에게 학문의 길을 열어주시고 늘 따뜻한 보살핌과 엄한 가르침으로 이 자리에 설 수 있게끔 도와주신 이종섭 교수님의 은혜에 깊은 감사의 인사를 드립니다.

그리고 항상 제자들을 위해 애쓰시는 토목공학과 교수님들께 감사의 인사를 드립니다.

항상 부족한 후배인 저를 친동생처럼 돌봐주시고 감싸주시는 수연회의 김차겸, 박명원, 이동수, 박일흠, 주귀홍선배님께 감사의 인사를 드립니다. 항상 조언을 아끼지 않으셨던 강태순, 최병중, 이왕관, 김종훈, 배경란, 서상태, 탁대호 후배님께도 감사의 마음을 전합니다. 오랜 시간동안 부족한 선배이지만 믿고 함께 해준 윤은찬, 백승우, 박석희군에게 고마움을 전하며 항상 굿은일을 도맡아하는 후배 박종화, 권기덕, 최광수, 김미은에게도 고마움을 전합니다.

부족한 저에게 따뜻한 배려와 지원을 아끼지 않으신 (주)선진건설 최동환 회장님, 윤정섭 사장님 이하 동료 임직원 분들과 언제나 믿음으로 묵묵히 지켜봐 주신 모든 가족들에게 이 영광을 돌리며 이 논문이 조그마한 선물이 되었으면 합니다.