

## 방파제 축조에 따른 조류변화 해석

이삼노 · 이우범\* · 박진형\*\*

여수대학교 해양토목공학과

\*여수대학교 환경공학과

\*\*전남대학교 토목공학과

### An Analysis on the Variation of Tidal Currents Due to Breakwater Construction

Sam-No Lee · Woo-Bum Lee · Jin-Hyung Park

*Dept. of Ocean Civil Engineering, Yosu National University*

*\*Dept. of Environment Engineering, Yosu National University*

*\*\*Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University*

#### ABSTRACT

When we construct some marine structures such as breakwater, we must investigate the influence on water quality environment due to the structure.

This paper describes the investigation of tidal current variations in Wando harbour before and after breakwater construction.

For the investigation, A two dimensional hydrodynamical numerical model is presented. An explicit finite difference scheme is used to solve the control equation of the model representing the tidal dynamics of the region.

From the results of physical and numerical experiment, Tidal elevation for the four major tidal constituents  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  are reproduced by the model. Tidal currents are promoted far from breakwater and in front of breakwater, but are decreased around the structure.

**Key Words :** Breakwater, Numerical Model, Hydrodynamical, Tidal Dynamics, Tidal Current

#### 1. 서 론

산업의 발달로 인한 물동량의 증가, 해상 수송 인구의 증가, 수산업의 발달 등으로 항만의 중요성을 점차 정도를 더하고 있어, 항만의 개발은 필수

적인 상황이다. 항만 건설에 따른 각종 설계 등에 필요한 기초 자료를 얻기 위해서 유동 현상 및 오염물질이동학산에 대한 해석이 필요하다. 각종 항만 공사가 주변 해역에 영향을 미치는 요소로는 조류, 해류, 밀도류, 연안류 및 파랑, 취송류 등

이 있으나, 연안역에서는 조류에 의한 영향에 지배를 받는다.

해수유동에 관한 모델은 평면 2차원과 3차원으로 나누어 볼 수 있는데, 3차원모델은 밀도 또는 염분변화 등에 의한 밀도차에 의하여 발생하는 흐름장을 해석하기 적합한 모델이다. 그러나 조석에 의한 조류와 같이 압력경사에 의해서 흐름이 발생하는 흐름장의 연구에는 평면 2차원 모델이 일반적으로 많이 쓰여지고 있다. 수심평균치를 사용한 평면2차원모델은 장주기파에 대한 수치계산이 소개된 후 주로 기상학분야로부터 발전하기 시작하여 1950년대 조류 및 조고의 계산이 행해져 수치계산의 유용성이 실증되었다<sup>1,2)</sup>. 그 후 Miyasaki et al.<sup>3)</sup>에 의하여 장주기파 차분화에 의한 기초식이 확립되었다. Peaceman과 Rachford 등에 의해 개발된 ADI법을 Leendertse가 multi-operation scheme에 의한 2차원 단층모델로 조류장과 확산모델로 적용하여 해석한 완화법, 축차가속완화법등의 수학적 모델이 최근까지 널리 이용되고 있다<sup>4~8)</sup>.

국내에서는 광양만의 조석현상을 SOGREAH모델로 해석하였고<sup>9)</sup>, 아산만, 경기만에서 조석 수치모형 실험을 실시하였고<sup>10)</sup>, 조석에 의한 수치모형 실험을 가막만에 적용하였고<sup>12,13,15)</sup>, 2차원 유한차분법 수치모형을 사용하여 연안해역에서 해수유동분석을 실시하였다<sup>10)</sup>.

본 연구의 대상 유역인 완도항은 남해안 서부 다도해의 중심항으로서 부근 해역의 해석은 대단히 중요하다. 특히 이 지역은 김, 미역 등으로 잘 알려진 수산자원과 크고 작은 물류부두, 해상피난처일 뿐만 아니라, 명사십리, 보길도 등의 관광지를 갖추고 있는 다기능, 다목적의 항만이며, 지형적으로 남해안 서쪽에 위치한 다도해의 최대 섬으로, 여러 큰 산들로 이루어져 있어 이들 산들이 해안에 이르기까지 절벽을 이루거나 기복이 심한 산지를 형성하고 있어 완도항 수계는 분기된 소규모의 협수로를 흐르는 세류뿐으로, 각 수로상과

작은 섬주변에는 조류의 영향으로 인한 해저지형이 많은 기복을 나타내고 있다. 연안해역의 해수유동은 조류와 해류가 복합되어 나타나며 주변 해저지형 및 기상의 영향을 크게 받고 있어서 대단히 복잡한 양상을 보이고 있다<sup>14)</sup>.

특히 해안선의 심한 굴곡과 좁은 수로 때문에 해수유동상태가 복잡하다. 본 연구에서는 완도항 해역의 물리환경에 미치는 영향을 알아보기 위하여 완도항을 중심으로 조사연구된 주변해양 물리환경에 대한 조석, 조류 등의 해양 환경현황을 파악하여 수치실험의 입력자료로 활용하여 냉파제 건설전·후의 조류 및 조위변화와 정도등을 분석한다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 기본방정식

완도항주변의 해역은 표층과 저층간의 유속 및 밀도차가 크지 않은 내만이므로 2차원 확산모델을 사용한다. 이를 위해 평균해면사이의 한 점을 원점으로 하여 좌표계를 정의하여 변수들을 평균해면하의 수심으로부터 평균해면상의 해면까지 적분한 후, 전체수심으로 나누어 준 수심평균 운동방정식과 연속방정식을 사용하여 유한차분음해법(ADI법)으로 시간분할 계산하여 해를 구하였다. 기본방정식은 아래와 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

운동 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = fv - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \nu \nabla^2 u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -fu - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \nu \nabla^2 v \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (4)$$

수심평균된 속도  $u$ ,  $v$  는 다음 식으로 나타내어 진다.

$$u = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u' dz \quad (5)$$

$$v = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v' dz \quad (6)$$

여기에서  $u$ 는  $x$ 방향의 평균속도,  $u$ 는  $y$ 방향의 평균속도,  $\zeta$ 는 기준면위의 수위,  $h$ 는 기준수면 아래의 수위,  $H$ 는 총수위,  $f$ 는 Coriolis parameter,  $g$ 는 중력가속도,  $c$ 는 Chezy 계수,  $v$ 는 점성계수이다.

## 2.2. 유한차분

기본방정식의 수치계산을 위하여 유한차분식(FDM)을 사용하였다.

대기압이 해수 유동에 미치는 영향이 없다고 가정하면 식(1), 식(2) 그리고 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_t + uu_x + vu_y - fv + g\zeta_x + gu(u^2 + v^2)^{1/2} / (c^2 H) - v(u_{xx} + u_{yy}) = 0 \quad (7)$$

$$v_t + vv_y + uv_x + fu + g\zeta_x + gv(u^2 + v^2)^{1/2} / (c^2 H) - v(v_{xx} + v_{yy}) = 0 \quad (8)$$

$$\zeta_t + (Hu)_x + (Hv)_y = 0 \quad (9)$$

다음 그림에서  $h$ 는 해면값을 계산하는 격자점이고  $u$ ,  $v$ 는 각각  $u$ 방향,  $v$ 방향의 유속을 계산하는 격자점이다.  $m$ ,  $n$ 은 각각  $x$ ,  $y$ 방향의 격자점수로서 위 격자망은  $m \times n$ 개의 격자점으로 구성된다. 격자선은  $x$ ,  $y$ 방향에 평행하며 각 격자선의 간격은  $S/2$ 로서 격자점의 간격은  $S$ 인 Staggered Grid System을 사용하였다.

위의 격자망을 이용하여 내부절점에서의 식(7), 식(8) 그리고 식(9) 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

- a)  $\frac{u_{t,i}}{(u^{k+1/2} - u^k)/2\tau} \quad at m+1/2, n$   
 $\frac{(u^{k+1} - u^{k+1/2})/2\tau}{(u^{k+1} - u^{k+1/2})/2\tau} \quad at m+1/2, n$
- b)  $v_t : as u_t, but \quad at m, n+1$
- c)  $\zeta_t : as u_t, but \quad at m, n$
- d)  $uu_x : \frac{(u^{k+1/2}_{m+1/2,n} - u^k_{m+1/2,n})/2\Delta x}{(u^{k+1/2}_{m+1/2,n} - u^{k+1}_{m+1/2,n})/2\Delta x} \quad (외삽법)$   
 $\zeta : \frac{(u^{k+1}_{m+1/2,n} - u^{k+1}_{m-1/2,n})/2\Delta x}{(u^{k+1}_{m+1/2,n} - u^{k+1}_{m-1/2,n})/2\Delta x} \quad (내삽법)$

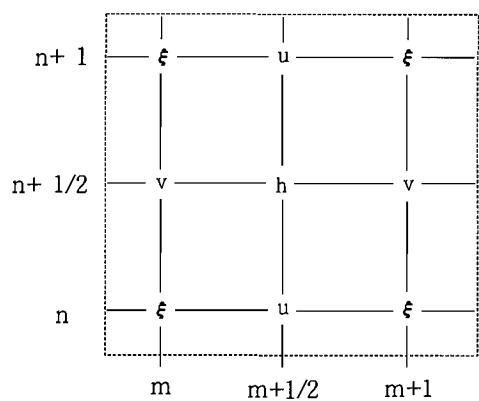


Fig.1 Staggered spatial grid

## 2.3. 모델의 구성 및 입력자료

해수유동수치계산을 위한 격자망의 구성에 있어 우선적으로 모델의 영역을 어디까지로 할것 인가를 결정하여야하는데, 본 수치계산에 사용된 모델의 영역은 완도항 부근을 중심으로 동서방향으로 6.0km, 남북방향으로 9.0km로 총면적 54km<sup>2</sup>의 해역을 모델의 해석범위로 삼아, 북쪽으로 고금도 남단 대야리, 남쪽으로 대구두, 서쪽으로 대야리, 동쪽으로 신리 강둑까지 포함하여 계산격자망을 설정하고 직교좌표계에서 X방향 121개, Y방향 181개의 격자망으로 총 21,901개의 격자점으로 구성하였고, 1격자 사이의 거리는 X방향 50.0m, Y방향으로 50.0m으로 구성하였다.

모델내의 해안선의 위치와 가격자점의 수심체택에는 해도(축적 1:25,000 수로국 No. 220)와 남안

제분도(축적 1:10,000 수로국 No. 261)의 자료를 이용하였다. 조사해역에서의 반일주기에 대한 일주조의  $B(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$ 는 대략 0.31정도이고  $S_2$ 가  $M_2$ 의 진폭보다 약 0.43배 정도가 되므로 개방경계면에서의 입력되는 조석파는  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  및  $O_1$ 를 동시에 고려하였다.

매시별 관측된 수위자료로부터 얻은 관측치를 조화분해하여 얻어지는 여러 분조 중에서 Table 1의  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  및  $O_1$ 의 조석을 합성한 가상의 조석조건을 평균대조로 사용하였다.

한편, 지구자전에 대한 전향력( $f$ )은 다음 식을 이용하였다.

$$f = 2\omega \sin \varphi \quad (10)$$

여기서,  $\omega$ 는 지구의 자전각속도,  $\varphi$ 는 위도이다.

본 연구에서는 완도항의 중심 위도인  $34^{\circ} 19'$ 를 사용하였다. 해저면의 마찰계수는 manning계수 0.026을 입력하였다. 평균수심은 완도항의 평균 수심인 2.0m를 사용하였다.

위의 모델의 해석을 위해서는 초기조건과 아울러 적절한 경계조건이 주어져야 한다. 초기조건은  $t=0$  일 때  $u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = \xi(x, y, 0) = 0$ 로 주어졌으며, 경계조건과의 불연속은 6조석 주기의 예비계산으로 충분히 제거되었다.

육상과 경계면에 수직한 속도성분값은 0이므로 Y방향의 경계면에서는  $H=0$ 에서  $u=0$ 이고 X방향의 경계면에서는  $H=0$ 에서  $v=0$ 이다. 결국 조

석운동에 따라 해수면이 상승하강하므로 육상경계면의 위치는  $H$  즉, 전체 수심에 의하여 결정된다.

계산시간간격은 조석파의 전파향에 대한 Courant-Friedrichs-Lowy의 안정조건식을 이용하여 구하였는데 다음과 같다.

$$C_r = \frac{4\sqrt{gH}}{\Delta S} \leq 20 \quad (11)$$

여기서,  $C_r$ 는 Courant 수,  $\Delta t$ 는 시간간격,  $\Delta S$ 는 격자간격,  $g$ 는 중력가속도  $H$ 는 최대수심이다. 완도항의 경우,  $\Delta S=50m$ ,  $H=35m$ 를 웃 식에 대입하면  $\Delta t \leq 53.9949$  된다. 따라서 본 수치실험에서는 18,6309초(1/2조석 주기/1200step)로 입력하였다.

모델을 통한 의해 개방경계에는 각각의 계산시간마다 조석조건이 입력되는데, 이 개방경계에서의 조건은 완도항내의 다른지점의 조석을 정확하게 재현할 수 있도록 개방경계의 조석조건을 약간씩 수정하면서 수차에 걸쳐 검증과정을 실시하였다.

실험은 초기계산과정에서 발생할 수 있는 수치의 불안정성을 고려하여, 분석에서는 제외하고 나머지의 계산결과를 분석하였다. 개방경계면에서 조사해역내로 조석파가 전파될 때 경계면에서의 반사파가 발생하므로 급격한 해면상승이 발생된다. 이러한 현상을 해결하기 위하여 연속방정식을 사용하여 반사파가 모델 밖으로 전파되게 하였다.

Table 1. Harmonic coefficient of the wando waters around

Position	Harmonic		$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$		Station N. E.
	H(cm)	k( $^{\circ}$ )	H(cm)	k( $^{\circ}$ )	H(cm)	k( $^{\circ}$ )	H(cm)	k( $^{\circ}$ )	H(cm)	k( $^{\circ}$ )	
Phengildo	103	282	42	302	24	195	19	171			34-21,127-01
Changgikro	91	282	41	303	26	196	16	170			34-21,126-53
Madosudo	113	285	59	300	25	195	19	182			34-26,126-51
Wando	107	284	46	308	27	194	20	172			34-18,126-45
Chungsando	96	289	40	314	25	200	22	178			34-11,126-51

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 방파제 축조시의 해수 유동

대조기의 창조시와 낙조시의 수치모델 분석결과를 Fig. 2과 3에 나타내었다. 완도항 부근의 유향은 인근해역과 판이한 양상을 나타내며 창조류는 완도항의 저조전 1~2시경부터 고조전 1~2시경까지 흐르며, 낙조류는 이와 반대현상을 보여주지만 남부(완도남단과 신지도 남단을 연결하는 선)과 북부(신지도 서단과 당도를 연결하는 선)을 경계로 인근 해역과 판이한 조시를 나타낸다. 최강유속은 평균대조기에 창(낙)조류  $0.07\sim 1.00\text{m/sec}$ 로써 창

- 낙조류는 다 같이 완도항의 고저시보다  $3.0\sim 4.5$  시조 빠른다. 완도 남단과 신지도 남단을 연결하는 선상에서 창조류의 최강유속은  $0.75\text{m/sec}$ 로 북서류하며 낙조류의 최강유속은  $1.0\text{m/sec}$ 로 남동류 한다. 완도항 북쪽 신지도 서단의 최강유속은 창

조류가  $1.3\text{m/sec}$ 로 북류하며 낙조류는  $1.1\text{m/sec}$ 로 남류한다. 그리고 장도 동측의 최강유속은 창조류가  $1.0\text{m/sec}$ 로 북류하며 낙조류는  $1.2\text{m/sec}$ 로 남남동류한다. 이 해역에서 전류 시가 가장 빠른 곳은 신지도 서단수로써 부근해역의 유향과는 특이한 현상을 나타내는 해역으로 반일주조류가 월등하게 우세한 지역으로 규칙적인 1일 2회의 창낙조류가 일어나며 일조부등은 연중 거의 볼수 없는 것이 조석과은 다른 특이한 현상이다. 유속은 대조 평균이  $1.0\text{m/sec}$ , 연중 최대 창조류가 약  $1.2\text{m/sec}$ , 낙조류가  $1.0\text{m/sec}$ 로 계산되며 최강유속은 거의 삭망시에 일어난다.

#### 2.2. 방파제의 축조전의 해수 유동

완도항의 방파제 설치에 따른 영향을 검토하기 위하여 북방파제를 전부 제거하기 위하여 인근 해역의 해수유동의 변화를 계산하여 Fig. 4과 5에

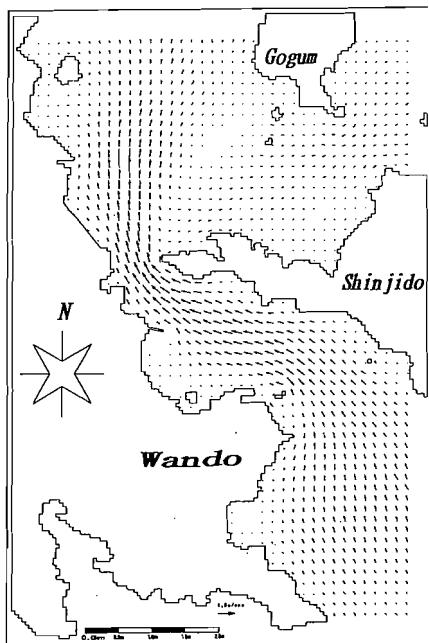


Fig.2. Flow analysis of the Breakwater construction (flood flow)

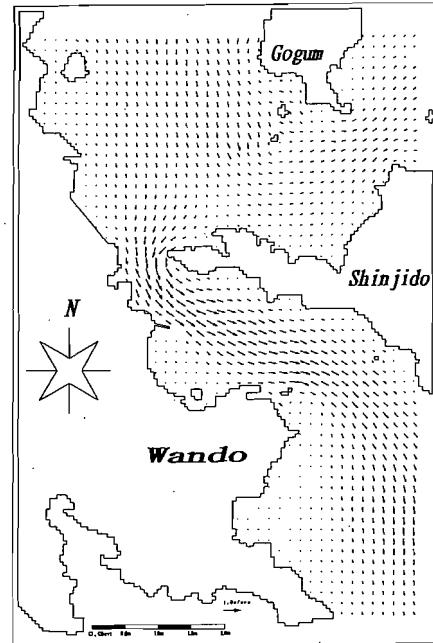


Fig.3. Flow analysis of the Breakwater construction (ebb flow)

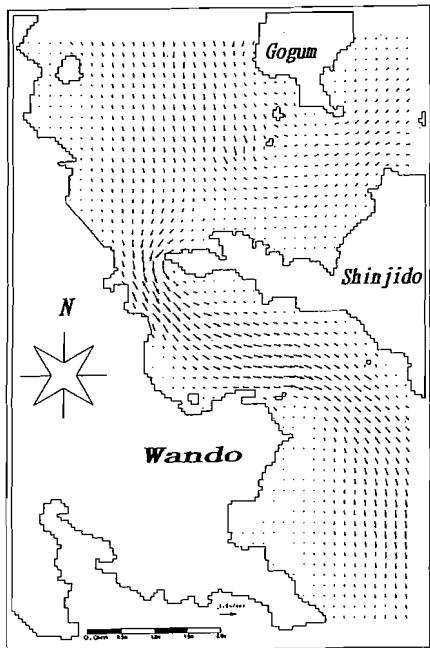


Fig.4. Flow analysis of the before Breakwater construction (flood flow)

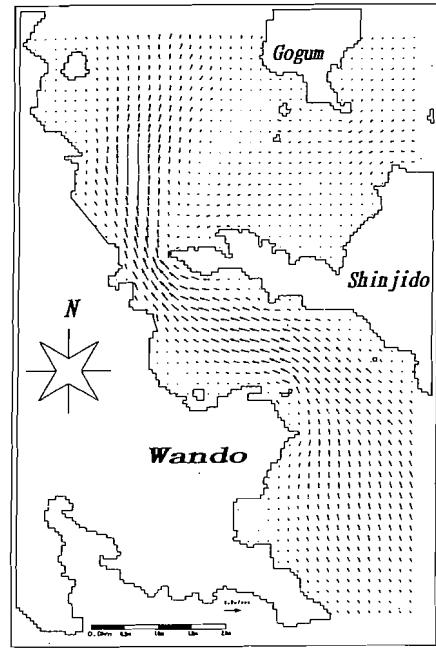


Fig.5. Flow analysis of the before Breakwater construction (ebb flow)

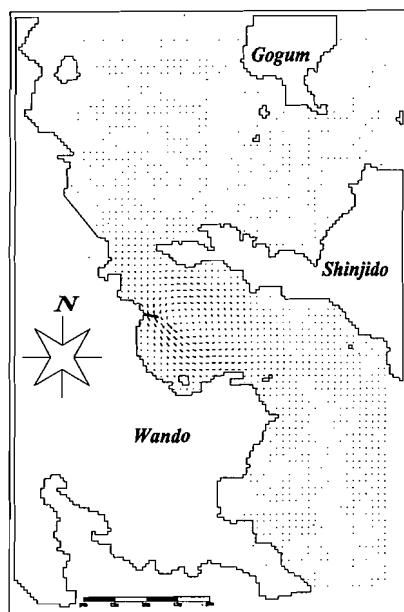


Fig.6. Absolute value of tidal current difference before and after Breakwater construction (flood flow)

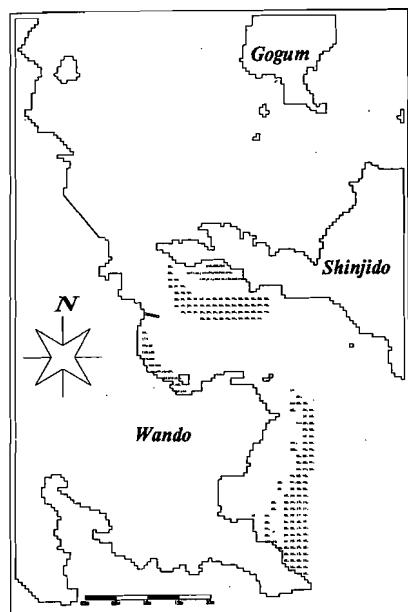


Fig.7. Increase range of velocity for the Breakwater construction(unit:%)

창·낙조시의 최강유속을 나타내었다. Fig.6는 방파제를 설치할 경우의 유동상황과 설치전의 유동상황의 차이를 나타낸 것인데 방파제와 주도를 연결하는 선상에서 약 0.26m/sec의 최고의 유속감소가 예측되며 여객선 터미널 인근의 해역은 0.14~0.19m/sec의 유속 감소가 예측되었다.

신지도의 강독 남단해역에서는 최고 0.19m/sec의 유속증가가 예측되었으며 오나도의 소구두 동단에서 남쪽으로 망남리 일대의 해역에서는 0.02~0.03m/sec의 유속 증가가 예측되었다.

유속이 증가된 해역과 유속이 감소된 해역을 구분하여 Fig.7과 8에 증감율을 나타내었다. 유속이 증가된 해역은 신지도의 강독하단과 소구두 동단에서 망남리에 이르는 해역과 완도항 내의 일부분이다. 유속이 감소된 해역은 방파제의 북단에서부터 여객선 터미널에 이르는 광범위한 해역과 소구두 인근 해역의 일부분과 신지도 신리 부근 해역이다.

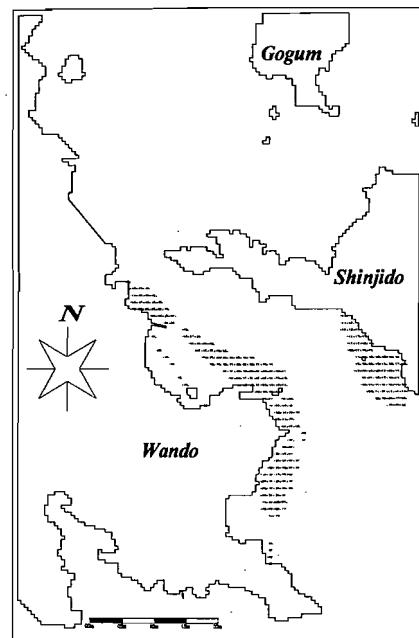


Fig.8. Decrease range of velocity for the Breakwater construction(unit:%)

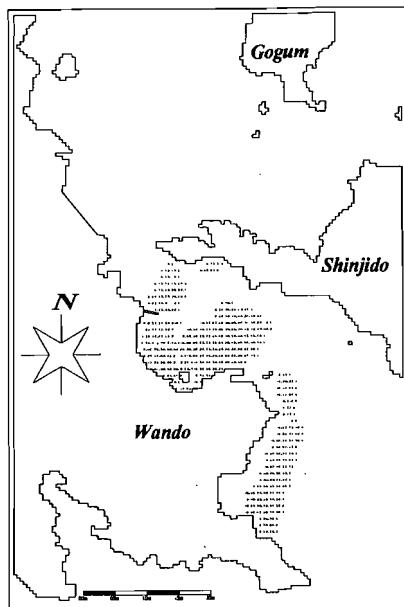


Fig.9. Varation range of current direction for the Breakwater construction(unit:0)

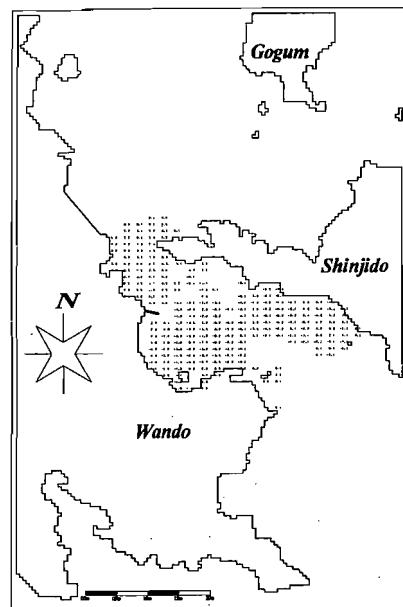


Fig.10. Varation range of tidal level for the Breakwater construction(unit:m)

방파제 설치에 따른 유향의 변화를 Fig. 9에 나타내었는데 완도항내에서 최고  $2.2^\circ$  의 변화가 일어났으며 목서하단의 경우  $0.2\sim0.4^\circ$  의 변화가 그리고 소구두 인근의 해역에서는  $2.3\sim2.9^\circ$  변화가 발생하는 것으로 계산되었다. Fig.10은 조위의 변화를 나타낸 것으로 완도항내에서의 최고 1.0cm가 변화되는 것으로 나타났으며 완도항과 신지도를 연결하는 항계내에서 0.1~1.0cm의 조위변화가 발생하는 것으로 계산되었다.

#### 4. 결 론

완도항의 해수유동에 관한 2차원 수치실험을 실시하여 방파제 축조시 어떠한 현상이 발생하는지를 검토하기 위해 경계조건설정이 용이한 평면 2차원 수치모형을 A.D.I.법으로 해석하여 조류의 수치모형을 제시하여 이를 완도항 부근에 적용하여 해의 적용성을 확인하고 방파제 축조에 따른 조류변화 양상과 범위 및 정도를 해석하였다.  
이를 요약하면,

- (1) 완도항 부근의 최강유속은 평균대조기에 창(낙)조류  $0.07\sim1.00\text{m/sec}$ 로써 반일주조류가 월등하게 우세한 지역으로 규칙적인 1일 2회의 창낙조류가 일어나며 일조부등은 연중 거의 나타나지 않는다.
- (2) 창,낙조시 최강유속에 따른 유속의 변화는 방파제 인근에서는  $0.14\text{cm/s}\sim0.26\text{cm/s}$ 의 감소를 기타지역에서는 부분적으로  $0.02\text{cm/s}\sim0.19\text{cm/s}$ 의 유속증가가 예측되었다.
- (3) 항내의 유향의 변화는 최고  $2.2^\circ$ , 목서하단의 경우  $0.2\sim0.4^\circ$ , 소구두에서  $2.3\sim2.9^\circ$  변화가 발생하는 것으로 계산되었다.
- (4) 조위의 변화 양상은 최고 1.0cm가 변화되는 것으로 나타났으며 완도항과 신지도를 연결하는 항계내에서 0.1~1.0cm의 조위변화가 발생하는 것으로 계산되었다.

#### 참 고 문 헌

- Dronker,J.J., "Tidal Computation in Shallow water" Prec. A.S.C.E., Hy6, vol, June, 7~11 (1955).
- Platzman, G. The Lattice Structure of the Finite-Difference Primitive an Vorticity Equations, Monthly Weather Review, 86(8), 285~292 (1958).
- Miyasaki, M. T. Ueno and S. Unoki, Theoretical Investigations of Typhoon Surges along the Japanese Coast, (I), Oceanogr. Mag., 13(1), (II), Oceaeogr. Mag 13(2) (1961 ~1962).
- Harleman, D.R.F, Numerical Studies of Unsteady Dispersion in Estuaries, J.San. Engr. Div., Proceedings, ASCE, 91(6), 897~911 (1970).
- Herbert F.Wang, Mary P.Anderson, Introduction to Groundwater Modeling, W.H Freeman and Company, 67~110 (1982)
- Leendertse, J.J., A water-quality Simulation Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Seas, Vol.2, The Rand Corporation, Santa Monica, California, 71~75 (1971).
- Mahmood, K. and V. Yevjevich, Unsteady Flow in Open Channels, Water Resources Publications, 1, 142~178 (1975).
- Stommel, H., Computation of Pollution in a Vertically Mixed Estuary, Sewage and industrial Waste, Journal, 25, 9. (1953).
- Bella,D.A. and W.E.Dobbins, Finite Difference Modeling of River and Estuary Pollution, Proceedings, National Symposium on Estuarine Pollution, Stanford University, 612~645 (1967).
- 이석우 · 최병호 · 김태인, 광양만의 조석현상, 광양

- 공업단지 조성에 관한 토목공학 심포지움,  
대한토목학회, 381~405 (1988).
- 이길성 · 강주환, 천수방정식의 유한차분특성, 대한  
토목학회논문집, 9(1), 41~45 (1989).
- 최병호, 아산만의 조류수치모형, 대한토목학회 논  
문집, 10(2), 129~130 (1990).
- 이삼노, 만내의 조류수치해석, 한국수문학회, 24(4),  
41~48 (1991).
- 이삼노, 조류에 의한 오염물질확산의 수치모형, 전남  
대학교대학원 박사학위 논문, 1~87 (1992).
- 목포지방해운항만청, 완도항 개발에 따른 어업권  
피해 조사 보고서, 257~310 (1996).
- 이삼노와2인, Environmental Change by a Water  
Front Development, W.R.E, 98 Proceeding,  
Memphis U.S.A, 856~961 (1998).