

## 노 트

# Heaps 모델을 이용한 천수만 해역의 조류해석

박 영 기

군산대학교 환경공학과  
(1995년 1월 16일 접수)

## Analysis of Tidal Current for Cheonsu Bay Using Heaps Model

Young-Ki Park

*Dept. of Environmental Engineering, Kunsan University, Kunsan, 573-360, Korea*  
(Manuscript received 16 January 1995)

### Abstract

Generally, It is introduced to well-known other models without considering tidal current of the field. The paper presents field measurements and numerical model solving velocity field of Cheonsu Bay by two-dimensional tidal model. It was proved that this scheme is easy to handle complex topography. Computed results is represented characteristics of tidal current for Cheonsu Bay.

The results of the study can be summarized as follows ;

1. Tide form number has 0.21 value. Tidal range estimated 630.3 cm on spring, 454.1 cm on mean and 277.9 cm on neap, respectively.
2. Tidal current has semi-diurnal form. Distance of traveling observed 16.6 km on flood and 15.5 km on ebb.
3. Tidal velocity showed reversing current. It was found that tidal velocity above 100 cm/sec is about 20 %.
4. Computed results are in good agreement with the observed data. Applying the algorithm to Cheonsu Bay, velocity fields and dry bank phenomena are simulated well in spite of complex topography.
5. An advanced study on the effects of open boundary conditions should be continuously performed.

Key Words : Characteristics of tidal Current, Field measurements, Numerical Model

### 1. 서 론

지난 20년동안 연안을 중심으로한 해안공사가 증가하고 있는 실정이다. 이에 따른 환경변화에

대한 영향평가로 해수유동기구의 예측은 실로 중요하다 할 수 있다. 최근에는 국내에서도 해양 수질의 예측에 관한 환경보전 문제가 거론되기 시작하고 있다. 이점에 대해 필자가 받은 인상은 현

지 해역의 조류상황에 신중한 고려없이 기존의 수치모형을 도입, 적용하는 경향이 있다는 것이다.

현재까지 조석파의 해석에서 가장 널리 쓰이고 있는 수학적모형은 수심적분된 2차원 인데, 조석파는 물론 항류의 흐름을 조사하기 위하여 응용되어 왔다. 지금까지 발표된 천해의 수치모형에 관한 연구들은 대개 조석에 의한 순간적인 해수유동을 파악하는데 관심을 두었다( Flather, 1976; Davis, 1983; Backhaus, 1983 ). 이들의 방법들은 지배방정식과 경계조건을 차분화 하는데 있어서 양해법이나 음해법을 사용하고 있다. 그런데 양해법으로 장시간의 모형을 운영할때는 CFL 안정조건에 제약을 받아 많은 계산시간이 요구되고 누적되는 절삭오차가 발생하기 쉽다. 또한 음해법은 CFL 시간간격 제약에 의존하지 않으나, 시간간격이 크게 CFL 조건을 초과 했을때 발생하는 파의 위상오차로 인해 수치해가 불안정하게 된다. 따라서 양해법의 안정성 한계와 음해법의 비경계성의 단점들이 모두 배제된 방법이 ADI방법( Leendertse, 1972 ) 이다. 이 방법은 한방향은 음해법으로 다른 한방향은 양해법으로 조위와 유속을 교대로 계산한다. 그런데 ADI 방법은 복잡한 지형에서 수치종속영역이 제한되므로 수심이 불규칙한 해역이나 해저협곡이 발달된곳, 또는 간사지가 광범위 하게 형성되어 있으면 정확한 결과를 기대하기 어렵다.

본 연구에서 적용된 해역은 우리나라 서해안 중심부에 위치한 천수만 으로서 주변의 수심이 매우 불규칙하고 간사지가 많은 해역이다. 따라서 해수유동을 정확히 이해하고 예측하기 위해서는 간사지에서 이동경계 처리가 가능한 2차원 모형으로서 정확도 및 안정성 검토가 이루어진 Heaps(1975)모형을 이용하였다. 또한 본 해역은 섬과 육지로 인해 외해와 단절되어 있는 폐쇄만의 입구형태로서 해수의 유동은 거의 조류에 의한 영향이 지배적이라고 생각된다.

따라서 본 연구는 천수만 해역에서 환경변화에 대한 결과를 예측하기 위한 기초자료로서 현지 해역에 알맞은 해수유동 기구의 특성을 해석하고자 한다.

## 2. 수치모형

### 2.1 조석 수치 모델

만이나 하구와 같은 폐쇄만의 천해역에서 조석파에 의한 해수유동 기구를 해석하는 것은 실로 중요하다. 따라서 본 수치실험 연구에서는 지형의 효과를 고려한 수치모델인 Heaps 모델을 구성하였으며 이를 유한차분법(Finite Difference Method)으로 재현하였다.

#### 2.1.1 기본 방정식

본 연구에서 수행한 조류 수치모형은 수심적분된 2차원 비선형 방정식과 연속방정식을 기본 방정식으로 사용하였다(Flather & Heaps, 1975). 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{ku(u^2 + v^2)^{1/2}}{H} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu - \frac{kv(u^2 + v^2)^{1/2}}{H} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서,

x, y : 2차원 직교좌표(x : 동쪽, y : 북쪽)

t : 시간(sec)

$\zeta$  : 평균해면으로부터의 해면값(m)

u, v : x, y 방향의 수심 평균된 속도(m/sec)

H : 전체 수심(h +  $\zeta$ )

h : 평균 해면하의 수심(m)

k : 해저면 마찰 계수(0.0025)

g : 중력 가속도(9.8m/sec<sup>2</sup>)

#### 2.1.2 초기조건 및 경계조건

앞절의 기본 방정식의 수치해를 구하기 위해서는 초기조건과 경계조건이 필요한데 그러한 조건들은 각각 다음과 같다.

초기에 전 체계내의 해수의 유동이 없다고 하

면, 식(4)와 같이 초기조건을 설정할 수 있다.

$$\text{즉, } t = 0 \text{ 일 때, } \zeta = u = v = 0 \quad (4)$$

또한 경계조건으로는, 육상 경계면에서 경계면에 수직한 속도 성분값은 0 이 되어야 하므로 y 방향상의 경계면에서는  $H = 0$  에서  $u = 0$  이고, x 방향상의 경계면에서는  $H = 0$  에서  $v = 0$  으로 설정하였다.

### 2.1.3 격자구성 및 유한차분식

조석 수치 모델링에서 기본 방정식의 수치해를 구하는 방법은 몇 가지가 있으나 본 연구에서는 유한차분식(FDE)을 이용하기 위해서 Fig.1과 같은 격자망(grid system)을 설정하였다. Fig.1의 격자망에서 o 표시는 해면값( $\zeta$ )을 계산하는 격자점이고 +, x 표시는 각각 u, v 를 계산하는 격자점에 해당한다. m, l 은 각각 x, y 방향의 격자점 수로서, 이러한 격자망은 m X l 개의 격자점으로 구성된다. 격자선은 x, y 방향에 평행하며 각 격자선 간의 간격은 s/2 로서 격자점간의 간격

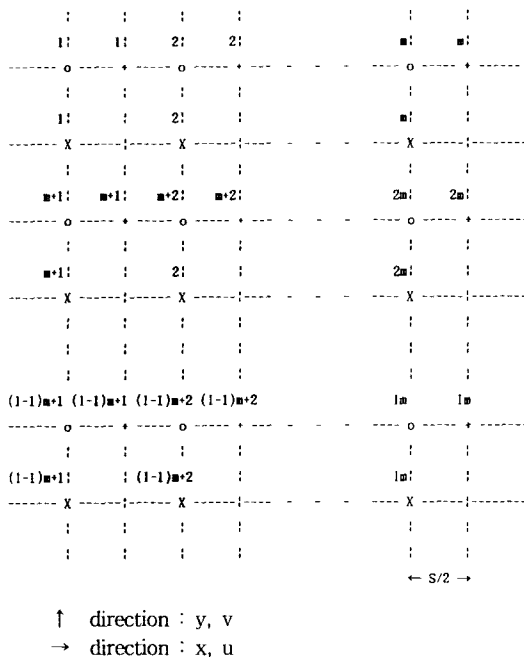


Fig. 1. Arrangements of the Staggered Grid System.

이 s인 staggered grid system 을 사용하였다. 이 격자망을 이용하여 비선형 이류항을 제외한 기본 방정식을 유한차분식으로 나타내면 식(5),(6),(7)과 같다. 비선형 이류항은 나중에 별도로 고려하였다.

$$\begin{aligned} & \{ \zeta_i(t+\tau) - \zeta_i(t) \} / \tau = \\ & - \{ d_i(t)u_i(t) - d_{i-1}(t)u_{i-1}(t) \\ & + e_{i-m}(t)v_{i-m}(t) - e_i(t)v_i(t) \} / s, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \{ u_i(t+\tau) - u_i(t) \} / \tau = f\tilde{v}_i(t) - ku_i(t+\tau) \\ & \{ u_i^2(t) + \tilde{v}_i^2(t) \}^{1/2} / D_{i(0)} - g \{ \zeta_{i+1}(t+\tau) \\ & - \zeta_i(t+\tau) \} / s, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \{ v_i(t+\tau) - v_i(t) \} / \tau = -f\tilde{u}_i(t+\tau) \\ & - kv_i(t+\tau) \{ \tilde{u}_i^2(t) + v_i^2(t) \}^{1/2} / E_i(t) \\ & - g \{ \zeta_i(t+\tau) - \zeta_{i+m}(t+\tau) \} / s, \end{aligned} \quad (7)$$

where

$$d_i = \frac{1}{2}(H_i + H_{i+1}), \quad e_i = \frac{1}{2}(H_i + H_{i+m}),$$

$$D_i = \max(d_i, H_0), \quad E_i = \max(e_i, H_0),$$

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{4}(u_{i-1} + u_i + u_{i+m-1} + u_{i+m}),$$

$$\tilde{v}_i = \frac{1}{4}(v_{i-m} + v_{i-m+1} + v_i + v_{i+1}),$$

$\tau$  는 각 계산단계 간의 시간증분 값으로서 이 값은 다음과 같은 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 안정조건을 만족시키도록 결정하였다.

$$\tau \leq \frac{s}{\sqrt{2gH_{\max}}} \quad (8)$$

여기서  $H_{\max}$  는 연구해역의 최대 수심이다. 마찰항  $ku(u^2 + v^2)^{1/2} / H$  은 분모가 수심이므로 수심이 0 으로 가까이 가게 되면 무한값으로 커지게 된다. 따라서 수심 10 cm이하의 경우에는 모두 수심 10 cm에서의 마찰계수를 적용하였다.

## 2.1.4 이동 경계 처리

조간대의 경우 썰물시 해저가 드러나는 경우가 발생하는데, 이런 격자점을 이동 경계 격자로 처리하여, 식(9),(10)과 같은 조건이 만족되는 격자에서만 새로운 유속을 계산하였다.

- (i)  $H_i(t+\tau) > 0$ ,  $H_{i+1}(t+\tau) > 0$  이면  
 $d_i(t+\tau) > 0$
- (ii)  $H_i(t+\tau) > 0$ ,  $H_{i+1}(t+\tau) \leq 0$ ,  
 $d_i(t+\tau) > 0$ ,  $\zeta_i(t+\tau) - \zeta_{i+1}(t+\tau) > \varepsilon$
- (iii)  $H_i(t+\tau) \leq 0$ ,  $H_{i+1}(t+\tau) > 0$ ,  
 $d_i(t+\tau) > 0$ ,  $\zeta_{i+1}(t+\tau) - \zeta_i(t+\tau) > \varepsilon$  (9)

즉, 식(9)의 조건이 만족되면  $u(t+\tau)$  를 계산하고 그렇지 않으면 0 으로 한다. 위 식에서 임계값으로 사용된 수심은 10 cm이다. 유사한 방법으로 식(10)과 같은 조건이 만족될 때, y 방향의 유속인  $v(t+\tau)$  를 계산한다.

- (i)  $H_i(t+\tau) > 0$ ,  $H_{i+m}(t+\tau) > 0$  이면  
 $e_i(t+\tau) > 0$
- (ii)  $H_i(t+\tau) > 0$ ,  $H_{i+m}(t+\tau) \leq 0$ ,  
 $e_i(t+\tau) > 0$ ,  $\zeta_i(t+\tau) - \zeta_{i+m}(t+\tau) > \varepsilon$
- (iii)  $H_i(t+\tau) \leq 0$ ,  $H_{i+m}(t+\tau) > 0$ ,  
 $e_i(t+\tau) > 0$ ,  $\zeta_{i+m}(t+\tau) - \zeta_i(t+\tau) > \varepsilon$  (10)

## 2.1.5 개방 경계 처리

개방 경계란 수치모델상에는 경계가 되지만 실제로 바다와 연결된 곳을 일컬으며, 개방경계면에서의 초기 입력 자료에 의해 모델 영역내에서의 조석의 형태가 결정된다. 이러한 개방경계면에서의 초기 입력자료로는 조석의 진폭 및 위상 자료를

를 사용하였다. 연구 해역내에서 조석파가 전파될 때 경계면에서 발생하는 반사파로 인하여 급격한 해면상승을 유발하기도 한다. 이러한 현상을 제거하기 위해서 개방경계면에서 식(11)과 같은 연속방정식을 적용하여 발생된 반사파를 모델 영역밖으로 전파되게 하였다.

$$\begin{aligned} u_{i-1}(t) = & \{ d_i(t)u_i(t) + e_{i-m}(t)v_{i-m}(t) \\ & - e_i(t)v_i(t) + (s/\tau) \{ \zeta_i(t+\tau) - \zeta_i(t) \} \\ & / d_{i-1}(t) \}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$d_{i-1} = \frac{1}{2} (h_{i-1} + \zeta_i + h_i + \zeta_i),$$

모서리 개방경계면에서는 Taylor 전개에 의한 외삽법을 적용하였다.

$$\begin{aligned} u_{i-1}^{(0)} = & -4u_{i-m} + 2(u_i + u_{i-m+1} + u_{i-2m} \\ & + u_{i-m-1}) - (u_{i+1} + u_{i-2m+1} + u_{i-2m-1}) \\ & + o(s^4), v_i^{(0)} \\ = & -4v_{i-m+1} + 2(v_{i+1} + v_{i-m+2} \\ & + v_{i-2m+1} + v_{i-m}) \\ & - (v_{i+2} + v_{i-2m+2} + v_{i-2m}) + o(s^4), \end{aligned} \quad (12)$$

$$d_{i-1} = \frac{1}{2} (h_{i-1} + \zeta_i + h_i + \zeta_i)$$

$$\text{and } e_i = \frac{1}{2} (h_i + \zeta_i + h_{i+m} + \zeta_i),$$

$$v_i^{(1)} = \{ Q - d_{i-1} u_{i-1}^{(0)} \} / e_i,$$

$$v_i^{(2)} = \frac{1}{2} \{ v_i^{(0)} + v_i^{(1)} \},$$

$$u_{i-1}^{(1)} = \{ Q - e_i v_i^{(2)} \} / d_{i-1},$$

$$u_{i-1} = \frac{1}{2} \{ u_{i-1}^{(0)} + u_{i-1}^{(1)} \},$$

$$v_i = \{ Q - d_{i-1} u_{i-1} \} / e_i,$$

$$\begin{aligned} Q(t) = & d_{i-1}(t)u_{i-1}(t) + e_i(t)v_i(t) \\ & d_i(t)u_i(t) + e_{i-m}(t)v_{i-m}(t) \\ & + (s/\tau) \{ \zeta_i(t+\tau) - \zeta_i(t) \}, \end{aligned} \quad (13)$$

## 2.1.6 비선형 이류항

비선형 이류항은 ‘angled derivative method’를 이용하여 계산하였다. 이 항들은 앞의 선형항들에 비해서 크기가 작지만 계산이 복잡하여 수치 계산 효율을 저하시킬 단점이 있기 때문에, 매 시간 간격마다 계산하지 않고 일정 간격 이후 마다 한번씩 계산하여 선형 결과에 가산하여 계산하는 방법을 취했다.

따라서 위에서 기술한 모든 것들을 고려한 최종적인 유한차분 방정식은 다음과 같다. 연속방정식은 앞서 기술한 내용과 차이가 없으며, 운동방정식은 식(14), (15)과 같이 바뀌게 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\{u_i^*(t+\tau) - u_i(t)\}}{\tau} \\ &= f\tilde{v}_i(t) - ku_i^*(t+\tau) u_i^2(t) + \tilde{v}_i^2(t) \}^{1/2} / D_i(t) \\ & \quad - g\{\zeta_{i+1}(t+\tau) - \zeta_i(t+\tau)\} / s \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\{v_i^*(t+\tau) - v_i(t)\}}{\tau} \\ &= -f\tilde{u}_i^2(t+\tau) - kv_i^*(t+\tau) \{u_i^2(t) + v_i^2(t)\}^{1/2} / E_i(t) \\ & \quad - g\{\zeta_i(t+\tau) - \zeta_{i+m}(t+\tau)\} / s \end{aligned} \quad (15)$$

여기에, 홀수 시간대의 경우  $i$ 가 증가함에 따라

x - 방향 :

$$\begin{aligned} & \frac{\{u_i(t+\tau) - u_i^*(t+\tau)\}}{\tau} \\ &= -\frac{1}{2s} \bar{u}_i^*(t+\tau) \{u_{i+1}^*(t+\tau) \\ & \quad - u_i^*(t+\tau) + u_i(t+\tau) - u_{i-1}(t+\tau)\} \\ & \quad - \frac{1}{4s} [ \{v_{i-m}^*(t+\tau) + v_{i-m+1}^*(t+\tau)\} \\ & \quad \{u_{i-m}(t+\tau) - u_i(t+\tau)\} \\ & \quad + \{v_i^*(t+\tau) + v_{i+1}^*(t+\tau)\} \\ & \quad \{u_i^*(t+\tau) - u_{i+m}^*(t+\tau)\} ] , \end{aligned} \quad (16)$$

y - 방향 :

$$\begin{aligned} & \frac{\{v_i(t+\tau) - v_i^*(t+\tau)\}}{\tau} \\ &= -\frac{1}{2s} \bar{v}_i^*(t+\tau) \{v_{i-m}(t+\tau) \\ & \quad - v_i(t+\tau) + v_i^*(t+\tau) - v_{i+m}^*(t+\tau)\} \\ & \quad - \frac{1}{4s} [ \{u_i^*(t+\tau) + u_{i+m}^*(t+\tau)\} \\ & \quad \{v_{i+1}(t+\tau) - v_i^*(t+\tau)\} \\ & \quad + \{u_{i-1}^*(t+\tau) + u_{i+m-1}^*(t+\tau)\} \\ & \quad \{v_i(t+\tau) - v_{i-1}(t+\tau)\} ] , \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{4}(u_{i+1} + 2u_i + u_{i-1}), \text{ 이다.}$$

$$\tilde{v}_i = \frac{1}{4}(v_{i-m} + 2v_i + v_{i+m}),$$

그리고, 짝수 시간대에서도 비슷한 방법을 취하되  $i$ 는 감소하는 방향으로 계산한다. 식(14), (15)에서 임시값인  $u_i^*(t+\tau)$ 와  $v_i^*(t+\tau)$ 를 계산하고 이를 이용하여 식(16), (17)로부터  $u_i(t+\tau)$ 와  $v_i(t+\tau)$ 를 결정한다.

## 3. 조류관측

## 3.1 조사방법

## 3.1.1 조석특성

천수만의 조석특성은 고정항의 기존관측소 측정자료와 송학리에서 관측된 기존자료(한국해양과학기술, 1991)를 중심으로 조사 분석하였다. 고정항 조석은 1986년의 1년치와 1991년 8월의 1개월치를 분석하였고, 송학리의 조석은 1991년 8월의 관측자료를 분석하였다.

## 3.1.2 해수유동 및 조류특성

정점 조류관측은 송학도 부근에서 관측된 4개 지점(Fig. 2)의 자료를 이용하였다.(한국해양과학

Table 1. Summary of observed tidal current for long-term

St. No.	Location	Depth	Observation	Period
PC-1	36° 23' 35" N, 126° 28' 54" E	18.3 m	9.2 m	'91. 8. 2.
PC-2	36° 23' 02" N, 126° 28' 46" E	21.3 m	10.7 m	'91. 8. 16.
PC-3	36° 22' 24" N, 126° 28' 16" E	28.4 m	14.2 m	
PC-4	36° 21' 37" N, 126° 28' 25" E	27.5 m	13.8 m	

Source : Korea Oceanographic Science Technology Ltd., 1991

기술, 1991). 장기관측은 4개 지점(PC지점)에서 Anderaa 자기유속계로 1991년 8월 2일에서 8월 16일까지 15일간 연속관측된 자료의 분석치를 사용하였으며, 관측개요는 Table 1과 같고, 매 20분 간격으로 유향과 유속이 기록되었다. 단기관측은 1991년 8월 31일에 Fig. 2의 PC-2 지점에서 정선 관측하였고, 조류모델의 검증자료로 활용되었다.

유동이 주로 천수만으로 유출입되는 조류에 의해 지배되고 있다. 조차는 대조기에 약 6.5 m, 소조기에 약 2.8 m로서 대조기와 소조기의 차가 크다. 송학도와 원산도 사이 수로를 통과하는 조류는 만의 남쪽 해수가 창조시에 북쪽으로 흐르고 낙조시에 만내부의 해수가 남쪽으로 향하는 왕복성 조류 특성을 보인다.

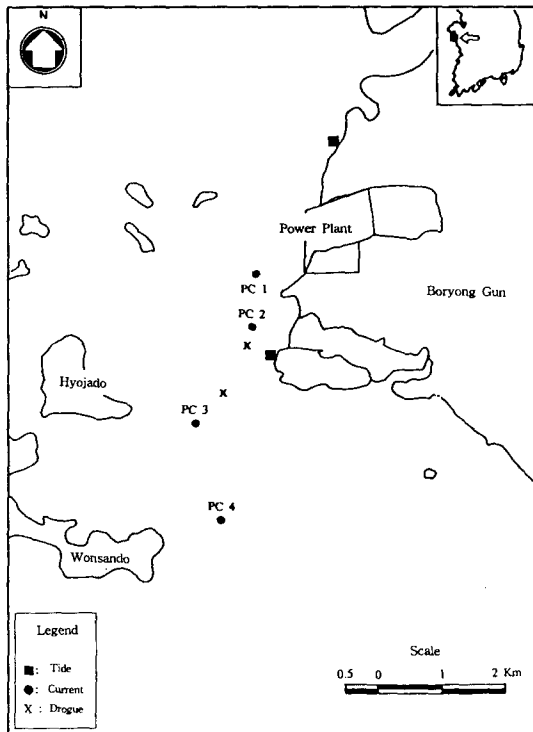


Fig. 2. Location map of tidal current measurement.

### 3.2 조사결과

발전소 부근의 해역은 천수만 입구로서 해수의

#### 3.2.1 조석특성

고정항과 송학도에서 분석된 조석의 조화상수 및 비조화상수는 Table 2와 같다. 주요 4대분조의 진폭과 위상에서  $M_2$ 분조의 진폭이 평균조차의 약 절반에 해당한다. 조석의 비조화상수는 조화상수로 부터 유도한 상수로서 조석의 특성을 나타낸다. 분석된 조석의 특성을 요약하면 다음과 같다.

조석의 주기성을 살펴보면 본 해역의 조석형태수는  $F = (H_k + H_o)/(H_m + H_s) = 0.21$ 을 갖는 반일주조형태의 조석으로서 일조부등이 적다. 송학리의 평균만조간격은 달이 자오선을 통과한 후 약 3시 02분이며, 평균간조간격은 9시 14분으로서 고정항에서 보다 약 1분 정도 빠르다. 즉 만조나 간조시각이 고정항보다 약 1분 정도 빨리 나타난다. 조차는 대조차, 평균조차 및 소조차가 각각 630.3 cm, 454.1 cm 및 277.9 cm이다.

#### 3.2.2 해수유동 및 조류특성

해수유동과 조류특성은 장기관측자료의 분석결과로 파악하였다. 장기간 관측된 유향과 유속을 통계적으로 파악하기 위하여 각 지점에서 관측된 자료를 매 10 cm/sec 간격의 16방위에 대한 조류출현율을 계산하였다(Fig. 3). 먼저 PC-1 지점에서

Table 2 Harmonic and non-harmonic constituents of tides

Location		Kojung(Standard)		Kojung		Sohakdo	
Latitude (N)		36° 24' 13"		36° 24' 13"		36° 23' 06"	
Longitude (E)		126° 29' 17"		126° 29' 17"		126° 28' 59"	
Period		1986. 1. 1-12.31		1991. 8. 1-8.31		1991. 8. 1-8.31	
Component	Har. Const.	Ampl.	Lag	Ampl.	Lag	Ampl.	Lag
		(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)
M <sub>2</sub>		Hm 229.4	km 86.8	Hm 228.9	km 88.2	Hm 227.1	km 87.8
S <sub>2</sub>		Hs 89.1	ks 130.8	Hs 86.7	ks 131.8	Ha 88.1	ks 131.5
K <sub>1</sub>		H' 36.1	K' 276.2	H' 39.0	K' 275.1	H' 36.7	K' 274.4
O <sub>1</sub>		Ho 27.2	Ko 247.9	Ho 28.3	Ko 249.9	Ho 28.3	Ko 248.6
M. S. L.							
So=Hm+Hs+H'+Ho		381.8 cm		382.9 cm		380.2 cm	
N	M. H. W. I.	3 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>		3 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup>		3 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup>	
	M. L. W. I.	9 <sup>h</sup> 12 <sup>m</sup>		9 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>		9 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup>	
O	H. H. W. L.	820 ('89.9)		-		-	
N	S. H. H. W. L.	763.6		765.8		760.3	
H	S. M. H. W. L.	700.3		698.4		695.3	
A	M. H. W. L.	611.2		611.8		607.2	
R	N. M. H. W. L.	522.1		525.1		519.1	
M	M. S. L.	381.8		382.9		380.2	
O	N. M. L. W. L.	241.5		240.7		241.2	
N	M. L. W. L.	152.4		154.0		153.1	
I	S. M. L. W. L.	63.3		67.4		65.0	
	S. L. L. W. L.	0.0		0.0		0.0	
C	L. L. W. L.	-32('90.12)		-		-	
O	S. T. R.	637.0		631.1		630.3	
N	M. T. R.	458.8		457.7		454.1	
S	N. T. R.	280.6		284.4		277.9	

서는 조류가 북북동과 남남서쪽으로 흐르며 강한 왕복성의 특징을 보이고 유속이 100 cm/sec 이상 되는 경우가 20% 정도이다. 남쪽으로 향하는 유형의 출현율이 크게 나타나는 점으로 보아 항류가 남남서쪽으로 향하고 있음을 알 수 있으며 관측기간동안 20-30 cm/sec의 항류가 있었다. PC-2 지점에서는 PC-1 지점과 같은 조류의 강한 왕복성의 특징이 미약하지만 100 cm/sec 이상의 강한 조류는 대부분 북동-남서 방향으로 향한다. 출현율이 남동-북서방향에서 비대칭을 보여 남동쪽으로 항류가 있음을 알 수 있고, 항류의 크기는 10-20 cm/sec 정도였다. PC-3과 PC-4 지점에서

는 창조류가 북쪽방향으로, 낙조류가 주로 남남동쪽으로 향하여 창조류의 비대칭이 나타난다. 이는 관측지점에서 항류성분이 동쪽으로 향하고 있음을 의미하며 관측기간동안 10 cm/sec 정도의 항류가 나타났다. 이 외의 조류특성은 다음과 같다.

조류의 형태수는  $F = 0.08-0.13$ 을 갖는 반일주조형 조류이다. 창조류는 간조 후 0.5-0.7시경에 북류하고, 낙조류는 0.6-0.8시경에 남류한다. 조류의 수직구조는 표층에 대한 중층 및 저층에서의 유속비가 각각 0.95 및 0.75이다. 조류의 이동거리는 창조시 16.6 km, 낙조시 15.5 km로 관측되었다.

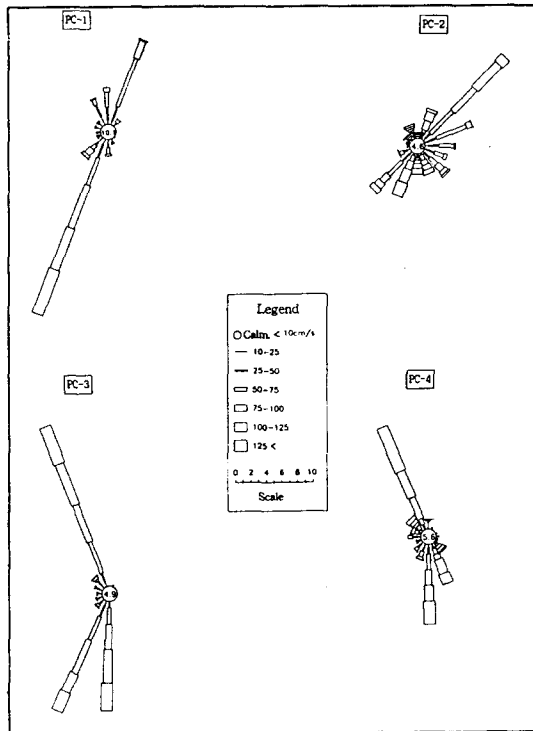


Fig. 3. Advent rate of tidal velocity and direction.

## 4. 수치모델의 결과 및 고찰

### 4.1 수치모델의 영역 및 입력자료

2절의 수치모델을 적용하기 위한 연구해역의 모델 영역은, 천수만을 포함하여 남으로는 용도와 대천해수욕장 아래쪽 지역사이, 동으로는 오천만을 포함하여 서해안의 육지를 경계로 하였다. 모델영역의 서측은 안면도와 원산도 사이 또는 일부 구간은 개방경계를 구성하고 있으며, 북측은 천수만내의 죽도 선상을 잇는 개방경계면으로 구성되어 있다. 개방 경계에서는 기존 관측자료 및 문헌자료 (Choi, 1980)를 이용하여 조석의 조위 및 위상을 내삽 지정하였다.

격자 하나의 크기는 x 방향 (동쪽), y방향 (북쪽) 으로 공히 375 m 의 정방형 격자를 사용하였다. 격자수는 x 방향으로 48개, y 방향으로 74개로서 총 3552개이며, 모델 영역의 크기는 동서로

18 km, 남북으로 27.75 km 이다. 모델 수행에 사용된 시간 간격은 12.4206초이며, 이는 CFL 조건을 만족하도록 설정된 값이다.

모델영역의 수심 입력자료는 교통부 수로국에서 발행한 해도 및 기존에 조사된 상세한 수심을 이용하여 결정하였으며, 조시에 따라 간사지가 일부 드러나는 인근 해역의 특성을 고려하여 수치모델 계산시 이동경계 처리를 하였다. 본 연구 지역의 조석은 조석 형태수 F가 0.21인 반일주조형의 조석이고 일조 부등이 비교적 적으며 하루에 두번의 만조와 두번의 간조가 나타나는 지역이므로 조류 수치모델 실험은 대조와 소조의 구분없이  $M_2$ 분조에 의해 재현하였다.

### 4.2 수치모델 결과의 검증

연구해역의 해수유동 조사에서 나타난 바와같이 천수만의 해수유동은 주로 조석에 의해 지배된다. 본 해역에서의 일주조 성분인  $K_1$  과  $O_1$  분조의 조고함은 반일주조 성분인  $M_2$  와  $S_2$  분조의 조고함에 비하여 약 0.2배 이므로 본 연구에서는 일주조 성분을 고려하지 않았고, 대조와 소조의 구분없이  $M_2$  분조에 의해 재현하였다.

수립된 수치모델을 검증하기 위해서 PC-2 지점에서 단기관측된 조류와 계산된  $M_2$ 분조에 대한 조류의 비교는 Fig. 4와 같다.

현재상태에서 조류분포를 간단히 나타내면 다음과 같다. 창조시의 조류분포는 천수만 입구인 송학도와 효자도 및 원산도 사이에서 유속이 100 cm/sec 이상으로 병목현상에 의해 유속이 강하며 북쪽인 천수만 안쪽으로 향하고, 안면도와 원산도 사이 수로에서는 동쪽으로 향하여 천수만으로 흐르고 병목현상에 의해 유속이 크다. 어항과 송학도를 잇는 선의 동쪽인 대천방조제 부근해역은 유속이 20 cm/sec 미만으로 매우 작으며 동서방향의 유속차이가 뚜렷하다. 송학도 북쪽에서는 만중앙의 작은 섬들(월도 등) 2개의 수심이 깊은 골에 의해 조류가 강한 구역이 2개로 나타난다. 오천만 입구 이북에서는 유속이 70 cm/sec 정도로 줄어든다. 낙조류는 창조류 유속과 비슷한 크기를



가지며 방향이 전반적으로 남쪽으로 향한다.

분석한 바와 같이 모델의 계산치 유속 역시 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 본 모델이 조사지역 인근해역의 조류현황을 비교적 잘 재현하고 있는 것으로 사료된다.

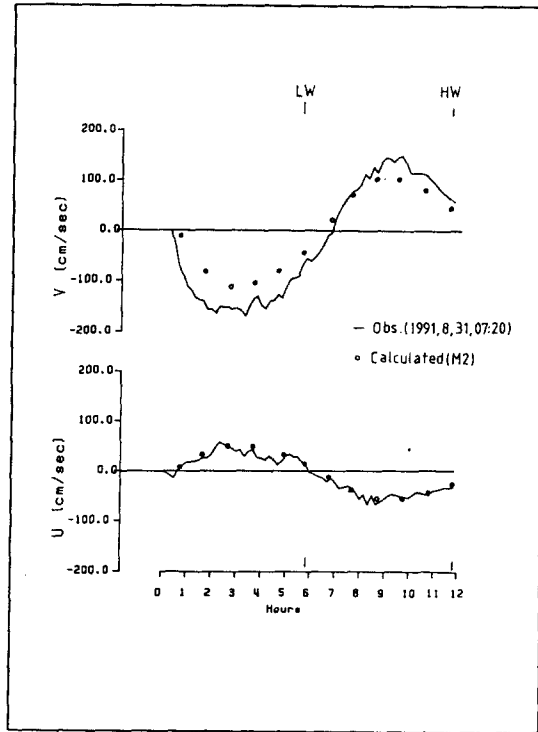


Fig. 4. Comparison of observed and computed M2 tidal currents on PC-2 St..

### 4.3 조류 변화

조류 수치모델 실험 결과를 창,낙조시와 고,저조시 별로 Fig. 5-8에 도시하였다. 모델의 외해경계역 입력조건은 현장 조사에서의 관측결과와 최(1980)의 결과로부터 결정되었으며, 4주기 계산한 후 1조석주기를 분석하였다.

천수만의 전반적인 조류형태는 원산도 동쪽과 북쪽 수로를 통하여 유입된 해수가 작은섬들의 동쪽과 서쪽 수로를 따라 북류를 형성하고 다시 낙조시에 남류를 형성하여 원산도 동쪽과 북쪽수로

를 통과하여 유출된다.

조시별로 조류의 분포를 살펴보면, 고조시에는 전 해역에 흐름이 나타나지 않고 다만 북측 개방경계쪽에서 썰물이 시작된다. 3시간이 지난후 최강낙조시 때에는 전 해역에 걸쳐서 썰물이 존재한다. 썰물은 월도등 작은 섬이 모여 있는 곳을 중앙으로 좌우측 해저 지형상 골로 나뉘어서 흐르고 있으며, 원산도의 영향으로 만 입구에서는 시계방향으로 휘어진다. 안면도와 월도, 월도와 발전소 배출구, 효자도와 송학도, 안면도와 원산도 사이에서 최강 유속이 나타나며 세기는 약 120 m/sec에 달한다. 또한 저조시에는 썰물에서 밀물로 바뀌는 전류상태가 나타나지만 전반적으로 밀물이 시작되어 서쪽의 외해경계, 안면도와 원산도 사이 수로에서는 강한 유속을 보인다. 그리고 대천항 근처에서 유입하는 조류의 세기가 크며, 송학도와 대천항 사이 만내에서 흐름이 존재한다. 그러나 오천만 내부에서는 아직까지도 썰물의 형태를 나타낸다. 최강창조시를 살펴보면 전해역에서 밀물이 더욱더 강화되었으며, 원산도와 안면도, 월도와 안면도, 월도와 발전소 배출구, 효자도와 송학도 사이 수로에서 조류의 흐름이 120 cm/sec 정도이다.

### 5. 결론

본 연구는 천수만 해역에서 환경변화에 대한 결과를 예측하기 위한 기초자료로서 현지 해역에 알맞는 해수유동 기구의 특성을 파악하고자 현장 조사 및 2차원 조류모형인 Heaps 모델을 적용하였다. 본 연구에서 얻어진 조류특성을 고찰하면 다음과 같다.

1. 본 해역의 조석형태수는 0.21이고, 조차는 대조차, 평균조차 및 소조차가 각각 630.3 cm, 454.1 cm 및 277.9. cm 이다.

2. 조류의 형태수는 0.08-0.13을 갖는 반일주조형 조류이고, 조류의 이동거리는 창조시 16.6 km, 낙조시 15.5 km로 관측되었다.

3. 해수의 유동은 창조시에 북북동쪽으로 흐르고 낙조시에는 남남서쪽으로 흐르며 강한 왕복성

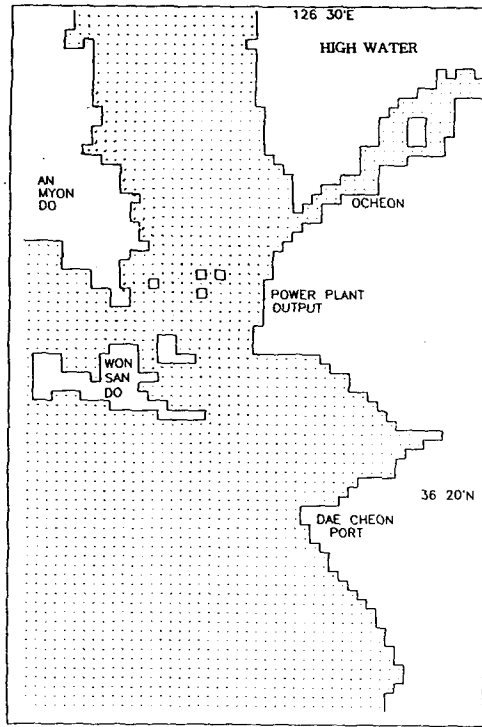


Fig. 5. Distribution of tidal current on high water.

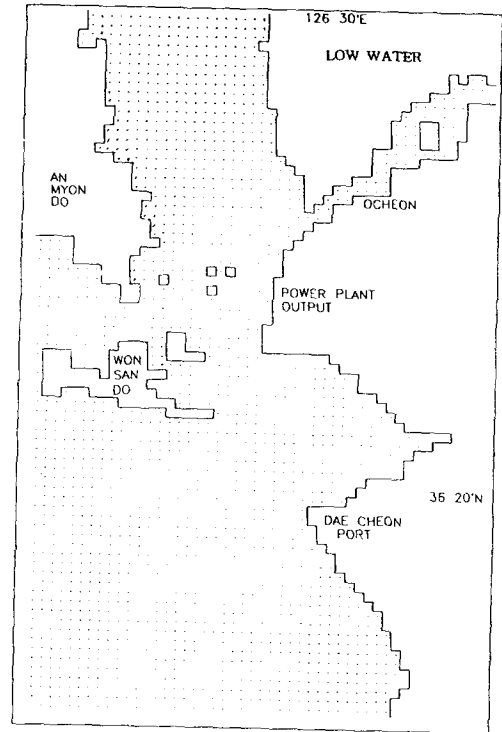


Fig. 7. Distribution of tidal current on low water.

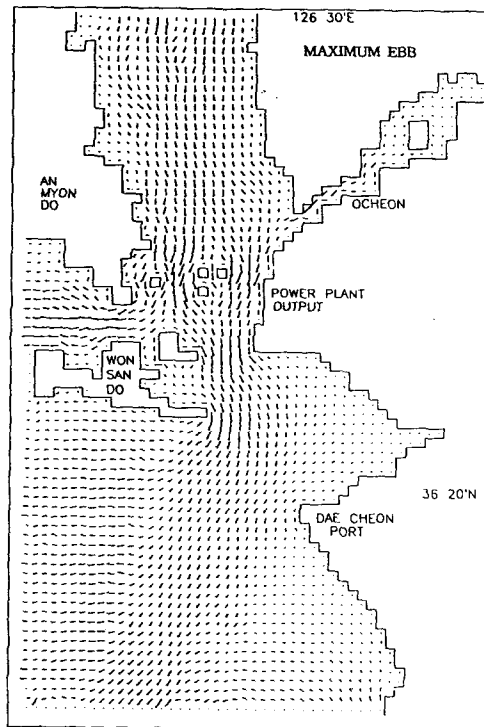


Fig. 6. Distribution of tidal current on maximum ebb.

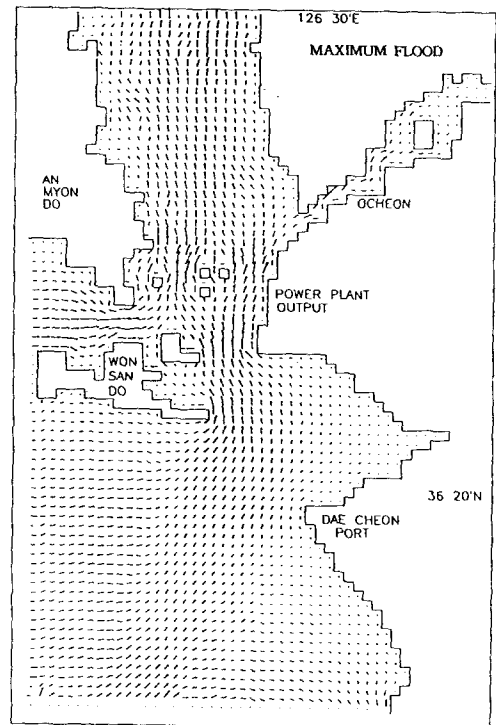


Fig. 8. Distribution of tidal current on maximum flood.

조류특성을 보이고 유속이 100 cm/sec 이상 되는 경우가 20% 정도이다.

4. 지형의 복잡성에도 불구하고 유속장 및 조건대가 매우 잘 재현되었으며 관측치와 비교한 결과 정확성도 입증되었다.

5. 모형의 신뢰성을 높이기 위해서는 개방경계 조건 및 적정 외해경계의 선정에 관한 연구도 지속적으로 실시되어야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- 강주환, 박상현, 이길성, 1983, 음해법을 이용한 천수방정식의 수치해석, 대한토목학회논문집, 제13권 제3호, 119-127.
- 이석우, 1992, 한국근해 해상지, 집문당, 334 pp.
- 최병호, 1980, 황해및 동지나해 조석 수치모델, KORDI report, 80-02, 10 pp.
- 한국해양과학기술, 1991, 고정화력발전소 조류관측 보고서, 임대용역주식회사, 17 pp.
- Backhaus J. O. and E. Maier-Reimer, 1983, On seasonal circulation patterns in the North Sea. In: North Sea dynamic, J. Sundermann and Lenz, editors, Springer-Verlag, Heidelberg, 63-84.
- Davies A. M., 1983, Application of the three-dimensional shelf sea model to the circulation of the North Sea. In: North Sea dynamic, J. Sundermann and Lenz, editors, Springer-Verlag, Heidelberg, 35-58.
- Flather R. A., 1976, Tidal model of the north-west European continental shelf, Memoires de la societe Royal des Science de Liege, Series 6, 141-164.
- Flather R. A. and N. S. Heaps, 1975. Tidal computations for Morecambe Bay. Geophys. J. Royal Astronom. Soc., 42: 489-517.
- Leendertse J. J., 1972, The behavior of the water quality simulation model. Rand Corporation, Santa Monica, 4810 pp.