

## 당항만의 해수유동에 관한 연구

김창제\* · 김미금\*\* · 손창배\*\*\* · 강성진\*\*\*\*

\*한국해양대학교 해사수송과학부 교수, \*\*한국해양대학교 승선생활관  
\*\*\*한국해양대학교 해양과학기술연구소, \*\*\*\*한국해양수산연수원 선박운항교육팀

### A Study on the Sea Water Flow in Danghang Bay

Chang-Je Kim\* · Mi-Kum Kim\*\* · Chang-bae Son\*\*\* · Sung-Jin Kang\*\*\*\*

\*Division of Maritime transportation, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Boarding Life Bldg. , Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*Research Institute of Marine Science and Technology Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*\*Korea institute of Maritime and fisheries Technology, Busan 608-080, Korea

**요 약** : 만의 일부만이 개방되어 있고 어선이나 군함 등의 선박통항이 빈번한 당항만을 대상 해역으로 하여 폐쇄성 연안해역의 해수유동에 대해 고찰하였다.

**핵심용어** : 조석, 해수유동, 조화분해, 해수교환율

**Abstract** : Recently, the water pollution of coastal sea area including harbor, bay and inland sea has been very serious and it causes various environmental impacts. In this study, water flow system of Danghang Bay, which has the narrow and long topographical characteristics with the narrow bay mouth and its flow is influenced principally by the tidal current, is investigated experimentally and numerically. In order to understand the tidal system of Danghang Bay, harmonic analysis is performed based on measured tidal range and flow velocity. In addition, numerical model for tidal exchange is developed considering conditions of Danghang Bay. Calculated results show good agreement with measurements. Lastly, based on the proposed numerical model, exchange ratio of seawater volume in Danghang Bay is predicted.

**Key words** : tide, sea water flow, harmonic analysis, exchange ratio of seawater volume

## 1. 서 론

항만, 내해 및 내만을 포함하는 연안해역은 최근 환경오염이 가속화되고 있는 실정이며 대부분의 만은 폐쇄성 연안해역의 형태로 외해와의 해수교환에 제한을 받는다.

만내의 유동은 조류에 의한 영향이 가장 지배적이라 할 수 있다. 따라서 해수유동이 존재하는 한, 부근 해역에서 배출되는 오·폐수는 만내로 유입될 수 있으며 따라서 만 일대에 상당한 오염 및 피해가 예상되므로 해수의 만내로의 유입과 순환 여부를 측정 할 필요가 있다.

이 연구에서는 만의 일부만이 개방되어 있고 어선이나 군함 등의 선박통항이 빈번한 당항만을 대상 해역으로 하여 폐쇄성 연안해역의 해수유동에 대해 고찰하고자 한다.

당항만은 사면이 산으로 둘러싸여 있으므로 태풍이 당항만 부근을 통과하지 않는 한 바람 및 파랑은 미약하며 부근 하천

등의 연계성을 살펴볼 때 인접하고 있는 대규모의 하천이 없으므로 부근 하천 등으로부터의 강물 유입량도 상당히 적을 것으로 판단된다. 그러므로 당항만 내의 흐름은 조류에 의한 흐름이 지배적이라 할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 현장 관측 결과를 고찰하고 조류모델링에 의한 해수유동과 관측한 결과를 비교·검토하여 만내의 해수유동을 파악하고자 하였다. 즉, 당항만 부근 해역의 자연환경과 현장관측 결과를 검토하고, 해수유동모델에 사용된 지배방정식과 경계조건에 대하여 설명하고 지배방정식을 조류모델링하는 과정 및 결과를 분석하였고, 해석해에 의해 만내의 해수유동을 추정하였다.

## 2. 당항만의 환경

### 2.1 자연환경

당항만은 경상남도 고성군 회화면에 위치한 만으로 입구의 폭은 약 750m, 만의 직선 길이는 4,500m이다. 좁은 입구의 폭에 비해 만내측 정곡 부근에서는 폭이 약 1,600m에 이르는 곳이 있으며 면적은 약 16,500,000m<sup>2</sup> 이다.

\* 정희원, kimc@hanara.kmaritime.ac.kr, 051)410-4226  
\*\* 정희원, ddochi-77@hanmail.net, 051)410-4193  
\*\*\* 정희원, kaigan@netian.com, 051)405-6535  
\*\*\*\* 정희원, kangjune@post.webkimft.or.kr, 011-579-0679

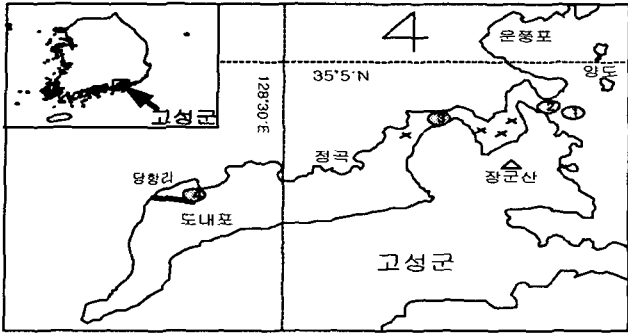


Fig. 2.1 Study area

조석은 일조부등을 나타내며 대조기의 조차는 약 260cm, 소조기의 조차는 약 120cm<sup>1)</sup>로 비교적 조차가 크지 않다.

진해만 해역의 창조류는 가덕수도를 북서류 하여 진해만으로 압류되면서 진해만 내부에서 반시계 방향으로 환류하는 현상이 있으며 일부는 견내량 해협으로 유출되고 낙조류는 이와 반대로 흐른다. 창(낙)조류는 진해항 저조 전 0.6~저조후 1.1(고조전 0.6~고조 후 0.5)시경에 전류하여 고조전 0.6~고조 후 0.5(저조전 0.6~저조 후 1.1)시경까지 약 5.6~6.2(6.2~6.8) 시간 지속되며 최강 창, 낙조류는 연간 평균 대조기에 15cm/s~50cm/s로써 저(고)조후 2.9~3.8(2.7~4.0)시경에 최강이 일어난다<sup>2)</sup>.

차폐된 만이므로 파고는 무시할 정도로 작다.

고성지방의 1999년 한해 강수량은 약 2,580mm, 2000년 한해의 강수량이 약 1400mm 정도이며 강수량이 계절에 따라 매우 불규칙하여 주로 7월, 8월 및 9월에 집중적으로 내리고 동절기에는 그 양이 아주 적다<sup>3)</sup>.

고성지역의 바람은 약한 편이며 특히, 당항만은 지형적으로 사면이 산으로 되어있어 바람이 더욱 약할 것이다.

당항만은 선박들이 빈번히 출입하는 곳이며 사면이 산으로 되어있고 입구가 좁아 외해로부터의 바람 및 파랑의 영향이 적어 소형 군함들의 피항처로 이용되고 있는 곳이다.

또한 당항만 인근의 마산 및 창원 등지는 대규모의 공단이 자리잡고 있으며 만의 매립에 대한 필요성이 부각되고 있는 실정이다.

2.2 현장관측

이 절에서는 당항만의 해수 유동현상을 파악하기 위하여 현장관측결과를 고찰하고자 한다.

2.2.1 관측개요

관측은 경남 고성군 회화면의 당항만에서 1999년 2월 19-20일 및 1999년 6월 15일-16일 두차례 실시하였다. 1차 및 2차 관측 모두 대조기에서 소조기로 넘어가는 중간 시기이다. 앞에서 언급한 Fig. 2.1에서 ①지점이 1차 관측시 유속과 파랑을 측정된 지점으로 만 입구에서 외해로 다소 벗어나 있으며 ②지점은 2차 관측시 유속과 파랑을 측정된 지점이며 ③지점 및 ④지점은 1차 및 2차 관측시 파랑을 측정된 지점이다.

2.3.2 관측결과

(1) 조석

Fig. 2.2는 당항만부근 고성만에서 1983년 5월 1일~5월 30일 동안에 측정된 조석을 조화분석한 결과<sup>4)</sup>와 본 연구의 관측기간 중 관측한 조석(point②)을 나타내는데 두 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그림의 기준값(0cm)은 관측 값을 평균하여 취하였으며 실선은 고성만의 조석이며 점선은 당항만의 조석이다.

Fig. 2.3은 1999년 2월 19일 ~20일 실시했던 현장관측 결과이다. 기호 ①, ③ 및 ④는 관측 시점으로서 ①는 첫번째 고조, ③는 저조 그리고 ④는 두 번째 고조를 나타낸다.

Table 2.1은 각 시점의 조위 및 각 시점에 이르는 시간을 나타낸다.

1차 관측결과 만 입구에서 만내로 진행할수록 조차는 대략 2cm 정도씩 작아진다. 이것은 조석이 만내로 진입하여 수로를 통과한 후 만의 폭이 넓어지면서 조석이 분산되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 또한 조시는 만내로 진행할수록 빨라지고 전 시점부터의 시간 즉, ①에서 ③ 및 ③에서 ④에 이르는 시간

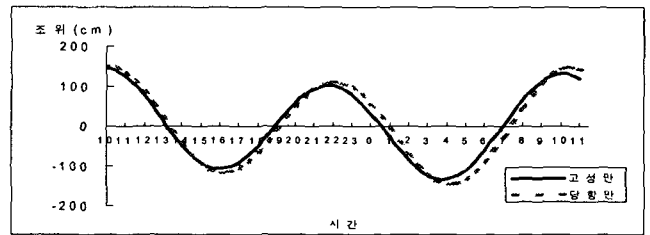


Fig. 2.2 Observed and calculated tide(point ②)

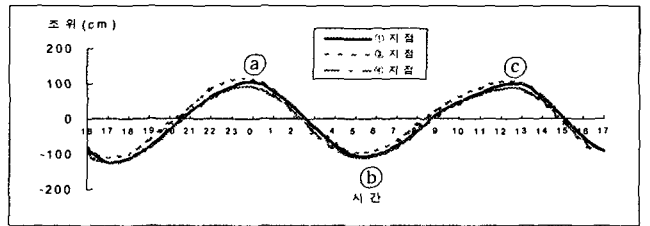


Fig. 2.3 Time series of tide (990219)

Table 2.1 Times and tidal heights at points (990219)

|                |   | ①     | ③     | ④     |
|----------------|---|-------|-------|-------|
| 조위(cm)         | ① | 104   | -123  | 99    |
|                | ③ | 106   | -119  | 101   |
|                | ④ | 102   | -121  | 97    |
| 시 간            | ① | 24:00 | 05:45 | 12:15 |
|                | ③ | 23:50 | 05:45 | 12:15 |
|                | ④ | 23:40 | 05:45 | 12:10 |
| 전 시점부터<br>소요시간 | ① | 06:00 | 05:45 | 06:30 |
|                | ③ | 06:15 | 06:05 | 06:30 |
|                | ④ | 06:15 | 06:05 | 06:25 |

이 길어지는데 이것은 만내부로 진입할수록 수심 및 해상의 지형이 완만해져 만 입구보다 일찍 고조 또는 저조 가까이 도달한 후 장시간 그 상태의 조위를 유지하면서 머물러 있기 때문으로 보인다.

①지점의 조차는 진해보다 약 30cm 더 크고 조시는 약 10~15분 늦다. 조차는 진해의 넓은 해역에서 좁은 방향으로 진행하면서 에너지가 집중되어 커진 현상으로 볼 수 있으며 조시의 차이는 조류가 진해를 거쳐 당항만까지 진행하는데 소요되는 시간의 차이 때문이다.

Fig. 2.4는 1999년 6월 15일 ~16일 실시했던 현장관측 결과이다. 기호 ㉑, ㉒ 및 ㉓는 관측 시점으로서 ㉑는 첫 번째 저조, ㉒는 고조 그리고 ㉓는 두 번째 저조를 나타낸다.

2차 관측결과, 1차 관측보다 ③지점에서의 조차는 약 10cm, ④지점에서의 조차는 약 6cm 크다. 이것은 2차 관측 시기가 대조기에 더 접근하였기 때문이며 또한 대체로 고조간 및 저조간의 시간 간격이 커졌다. 1차 관측결과와 마찬가지로 만내부로 진행할수록 조차가 작아지고 고조 또는 저조에 이르는 시간이 빠르다.

Table 2.1은 각 시점의 조위 및 각 시점에 이르는 시간을 나타낸다.

(3) 조류

Fig. 2.5 및 Fig. 2.6은 만입구 부근에서의 시간별 유속을 상, 중, 하층으로 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 (+)는 유입되는 방향이며 (-)는 유출되는 방향을 나타낸다. 최강 창조류는 310° 방향으로 47cm/s, 낙조류는 160° 방향으로 36cm/s이며 ①지점에서 상층은 유입과 유출을 반복하며 중층은 유출하는 흐름이

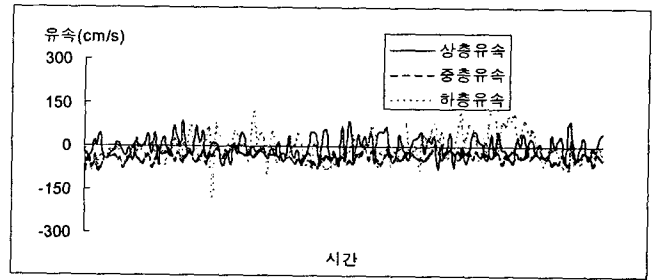


Fig. 2.5 Time series of current speed (990219)

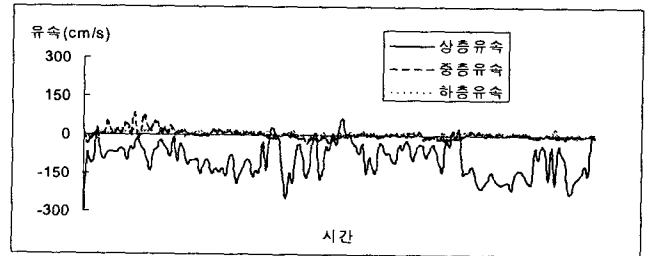


Fig. 2.6 Time series of current speed (990615)

탁월하고 하층은 유입과 유출을 반복하나 유입하는 흐름이 더 많이 나타난다. ②지점에서 상층은 유출하는 흐름이 대부분이고 중층은 유입과 유출을 반복하며 하층은 유입하는 흐름이 탁월하다. 즉 하층으로 유입하고 상층으로 유출하는 형태로서 좀 더 정확한 고찰을 위해서는 만내에서의 유속의 연직분포도 함께 검토할 필요가 있다.

### 3. 모델링

Table 2.2 Times and tidal heights at points (990219)

|                |   | ㉑     | ㉒     | ㉓     |
|----------------|---|-------|-------|-------|
| 조위(cm)         | ② | -117  | 124   | -136  |
|                | ③ | -115  | 120   | -106  |
|                | ④ | -113  | 116   | -107  |
| 시 간            | ② | 15:40 | 22:15 | 05:00 |
|                | ③ | 15:20 | 22:05 | 04:40 |
|                | ④ | 15:20 | 22:00 | 04:15 |
| 전 시점부터<br>소요시간 | ② | .     | 06:35 | 06:50 |
|                | ③ | .     | 06:45 | 06:35 |
|                | ④ | .     | 06:40 | 06:15 |

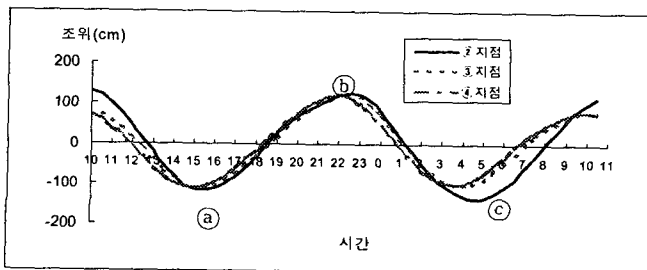


Fig. 2.4 Time series of tide (990615)

#### 3.1 지배방정식

##### 3.1.1 연속방정식과 운동방정식

주기가 긴 장파로 알려진 조석에 의한 연안해역에서의 해수 흐름은, 연안해역의 수평 scale이 연직 scale에 비해 상당히 크기 때문에 연직방향으로 수심 평균한 2차원 흐름으로 취급 할 수 있다.

유체는 점성, 비압축성, 압력은 정수압분포라고 하고 연속 방정식과 운동방정식을 해면과 해저면에서의 경계조건을 이용하여  $z = -h$  에서  $\eta$ 까지 적분하면 다음 식이 된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} = & f q_y - g(\eta+h) \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 q_x - \tau_{bx} \\ & - (\eta+h) \left\{ \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} = & -f q_x - g(\eta+h) \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 q_y - \tau_{by} \\ & - (\eta+h) \left\{ \frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기에서  $t$ 는 시간(s),  $g$ 는 중력가속도,

$$q_x = \int_{-h}^{\eta} u \, dz, \quad q_y = \int_{-h}^{\eta} v \, dz,$$

$f$  는 코리올리 계수 ( $=2\Omega \sin \phi$ ,  $\Omega$ 는 지구자전각속도,  $\phi$ 는 위도)

$A_h$  는 수평와동점성계수,

$$\nabla_h^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

$$\bar{u} = \frac{1}{h+\eta} \int_{-h}^{\eta} u \, dz, \quad \bar{v} = \frac{1}{h+\eta} \int_{-h}^{\eta} v \, dz,$$

$\vec{\tau}_b = \frac{\rho f}{g} \vec{V} |\vec{V}|$ ; 해저면 전단응력 ( $\rho$ 는 해수의 밀도,  $f$ 는 마찰계수(0.004)<sup>5)</sup>)이다.

### 3.2 수치해석

이 연구에서는 양해법인 FTCS(Forward Time difference, Centered Space)법을 수치해석기법으로 적용하였다.

#### 3.2.1 안정조건

계산시간 간격과 공간간격은 다음과 같은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)의 안정조건을 고려하여 결정하였다<sup>6)</sup>.

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} \geq \sqrt{2gh_{\max}}$$

여기에서,  $\Delta s$  ( $=\Delta x = \Delta y$ )는 공간간격이며,  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 공간간격,  $\Delta t$ 는 시간간격,  $h_{\max}$ 는 대상해역의 최대수심이다.

#### 3.2.2 유한차분법

##### (1) 수위변동의 차분화

수위변동  $\eta$ 의 경우, 연속방정식을 다음과 같이 차분화 한다.

$$\eta^{t+1(i,j)} = \eta^{t(i,j)} - FX^{t(i,j)} + FX^{t(i,j)} - FY^{t(i,j+1)} + FY^{t(i,j)} \quad (3.3)$$

여기에서

$$FX = (\eta + h) u \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{는 } x \text{ 방향,}$$

$$FY = (\eta + h) v \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{는 } y \text{ 방향 운동방정식의 차분화 변수}$$

이다.

##### (2) 수심평균유속

수심평균유속은 아래와 같은 방법으로 계산한다.

$$u(i,j) = 2 \frac{\Delta s}{\Delta t} \frac{FX(i,j)}{\eta(i,j) + \eta(i-1,j) + 2dx(i,j)}$$

$$v(i,j) = 2 \frac{\Delta s}{\Delta t} \frac{FY(i,j)}{\eta(i,j) + \eta(i,j-1) + 2dy(i,j)} \quad (3.4)$$

여기에서

$$dx(i,j) = \frac{1}{2} [d(i,j) + d(i-1,j)]$$

$$dy(i,j) = \frac{1}{2} [d(i,j) + d(i,j-1)] \text{ 이며}$$

$dx$  및  $dy$  는 이웃한 두 격자 사이 수심이다.

#### 3.2.3 경계조건

##### (1) 해면 및 해저면 경계

해면 및 해저면 경계는 다음 식(3.5)를 적용한다.

$$-\frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w = 0 \text{ at } z = \eta$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \text{ at } z = -h \quad (3.5)$$

##### (2) 구조물경계 또는 해안경계

구조물과 바다 또는 육지와 바다를 각각 '0'과 '1'로 표시하고 '0'이 인식된 구조물 또는 육지는 계산에서 제외시킨다<sup>7)</sup>.

##### (3) 폐쇄 경계조건

해안선에서는 불 투과성의 경계조건이 성립하지만 평활 과정과 비선형항의 계산에서 불 투과 조건을 만족시키기 위해 다음과 같은 방법을 사용한다.

$$v(i-1,j) = -v(i,j),$$

$$FY(i-1,j) = -FY(i,j)$$

##### (4) 개방 경계조건

조석의 진폭 158cm를 강제조위로 입력하여 계산을 수행하였다.

#### 3.2.4 격자

대상해역을 Fig. 3.1에 나타낸 것처럼 격자를 구성한다. 초기 입력된 수심자료에 의해 각 격자의 중심(■)의 수심이 결정되고,  $\Delta s$ 를 2등분하여 운동방정식의 차분화 변수로써  $x$ ,  $y$ 방향으로 이웃한 지점(●, □)에 각각의 유속  $u$ ,  $v$ 를 결정하는 staggered grid 방법을 채용한다.

#### 3.3 모델링 결과

Fig. 3.2에 ②지점에서의 관측조석과 모델링 결과를 나타낸다. 모델링 결과와 관측조석은 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3.3~Fig. 3.4는 각각 고조 및 저조의 모델링 결과이다. 만입구에서는 해수유동이 활발히 이루어지고 있으나 만내측 특히, 당항리 부근에는 지형에 따라 해수유동이 거의 없음을 알 수 있다.

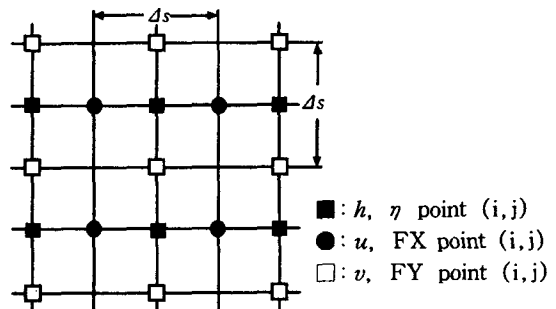


Fig. 3.1 Grid system

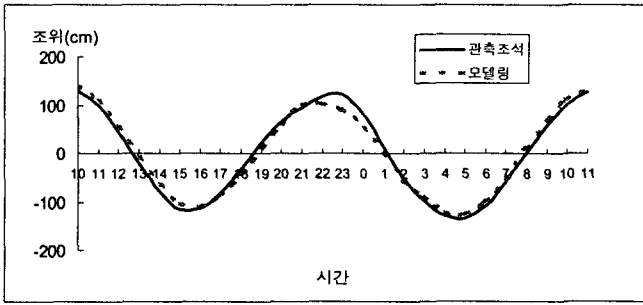


Fig. 3.2 Comparison between observed and modeling result

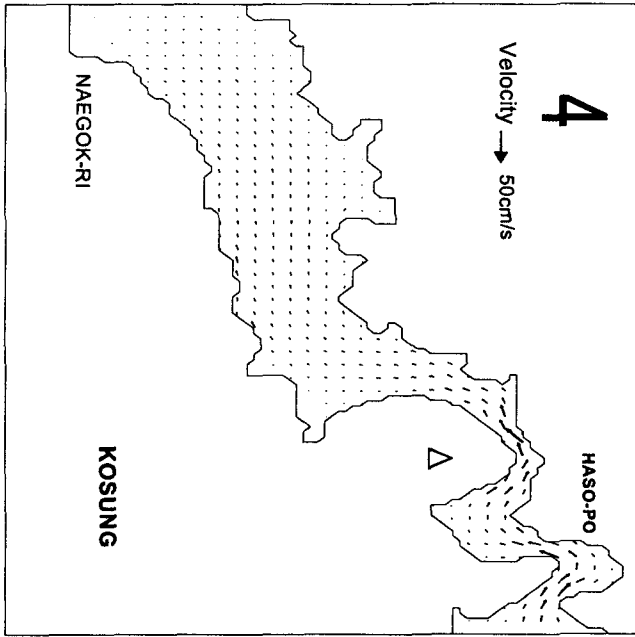


Fig. 3.3 Velocity chart at high water

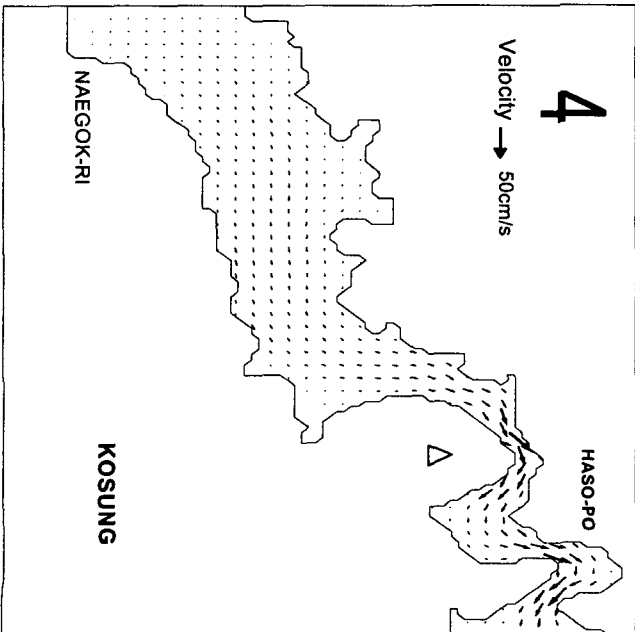


Fig. 3.4 Velocity chart at low water

## 4. 해수유동추정

### 4.1 만내 조석 및 수로유속

만 입구의 수로 길이  $l$ , 수로 폭  $B$  및 수로수심  $h$ 인 일정단면 (1차원) 수로에서 만과 바다가 접하고 있는 경우를 고려한다.  $x$ 는 앞에서와 마찬가지로 바다 쪽의 끝을 원점으로 하고 만내수 역방향을 양(+)으로 하는 좌표이다.  $S$ 는 만의 표면적,  $\eta_s$ 는 외해의 수위,  $\eta_b$ 는 만내의 수위,  $f_c$ 는 유출입손실계수,  $v$ 는  $x$ 방향의 수심평균유속 및  $g$ 는 중력가속도이다.

일차원 수로의 해석해를 구하는 과정을 다음에 요약한다<sup>8)</sup>.

일반적으로 협수로의 길이  $l$ 은 조석파의 파장에 비해 극단적으로 짧으며 수로내의 수면구배는 일정하다는 가정을 하면 유속  $v$ 는 시간  $t$ 만의 함수가 되고 연속식과 유출입 손실을 고려한 운동방정식은 식(4.1a,b)와 같이 된다.

$$Av = S \frac{d\eta_b}{dt} \quad (4.1a)$$

$$\frac{dv}{dt} + g \frac{\eta_b - \eta_s}{l} + kv = 0 \quad (4.1b)$$

여기에서

$A$ 는 유수 단면적,  $k = 4V(2g n_r^2 - f_c R^{4/3}) / 3\pi R^{4/3}$  ( $V$ 는 유속 진폭,  $R$ 은 경심이며  $n_r$ 은 등가조도  $(= n \left(1 + \frac{f_c R^{4/3}}{2gl n^2}\right)^{1/2}$ ,  $n$ 은 manning의 조도계수)이다.

식(4.1)에서  $v$ 와  $\eta_b$ 를 분리하고  $\eta_s$ 에  $\eta_{x=0} = a_s \cos \sigma t$  ( $a_s$ 는 외해조석의 진폭,  $\sigma = 2\pi/T$ )를 대입한 후  $v$ 값을 구하면 식(4.2)가 된다.

$$v = - \frac{\beta}{\sqrt{(a - \sigma^2)^2 + k\sigma^2}} \sin(\sigma t - r) = -V \sin(\sigma t - r) \quad (4.2)$$

여기에서  $\alpha = Ag/lS$ ,  $\beta = a_s g\sigma/l$ ,

$$V = \beta / \left\{ \sqrt{(a - \sigma^2)^2 + (k\sigma)^2} \right\} \text{ 및}$$

$r = \tan^{-1} \{ k\sigma / (a - \sigma^2) \}$  이다.

식(4.2)를  $k = 4V(2g n_r^2 - f_c R^{4/3}) / 3\pi R^{4/3}$  을 이용하여  $V$ 에 관하여 정리하면 유속의 진폭  $V$ 는 다음과 같이 된다.

$$V = \frac{\sqrt{-\left(\frac{AgT^2}{4\pi^2Sl} - 1\right)^2 + \left(\frac{AgT^2}{4\pi^2Sl} - 1\right)^4 + 4\left(\frac{2g^2 n_r^2 a_s}{3\pi^3 l R^{4/3}}\right)^2}}{2\left(\frac{4T n_r^2 g}{3\pi^2 R^{4/3}}\right)} \quad (4.3)$$

식(4.3)에서  $V$ 는  $A, h, R, l, n_r$  및  $S$ 인 수로의 내수역의 특성과  $T$  및  $a_s$ 라는 외해조석의 제원에서 직접 계산된다. 또한  $r$ 는 다음과 같다.

$$r = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)^4 + 4\left(\frac{\beta\sigma}{\sigma^2}\right)^2} \right\}}}{\left(\frac{\alpha}{\sigma^2} - 1\right)} \right] \quad (4.4)$$

동일한 방법으로 식(4.1)에서  $v$ 와  $\eta_b$ 를 분리하고  $\eta_s$ 에  $\eta_{x=0}$

=  $a_s \cos \omega t$  를 대입한 후  $\eta_b$ 를 구하면 다음과 같은 해가 얻어진다.

$$\eta_b = \frac{a_s a \cos(\omega t - \gamma)}{\sqrt{(a - \sigma^2)^2 + (k\sigma)^2}} = a_b \cos(\omega t - \gamma) \quad (4.5)$$

여기에서  $a_b$ 는 내수역의 조위진폭이다.  $a_b$ 의  $a_s$ 에 대한 비는 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{a_b}{a_s} = \frac{(a/\sigma^2)}{\sqrt{\left\{ \left( \frac{a}{\sigma^2} - 1 \right)^2 + \left( \frac{a}{\sigma^2} - 1 \right)^4 + \left( \frac{\beta b}{\sigma^2} \right)^2 \right\}}} \quad (4.6)$$

외해조석은 1999년 6월 15일 ②지점에서 관측한 값을 준용한다.  $\eta_b$ 는 외해조석의 각 분조에 관해서 식(4.4)와 (4.6)에서  $a_b$ ,  $\gamma$ 를 계산하고, 이들 내수역 분조의 합성치로서 계산 결과를 각각 그래프로 표현하면 Fig. 4.1을 얻는다.

Fig. 4.1에서 관측조석, 모델링 및 해석해가 거의 일치한다. 또한 만의 수로유속을 계산하여 각각 그래프로 표현하면 Fig. 4.2를 얻는다.

Fig. 4.2에서 관측 유속 및 모델링은 ②지점에서의 유속이며 해석하는 당항만의 입구를 일정단면 수로로 가정하여 계산한 수로 전체의 유속이다. 관측유속, 모델링 및 해석해가 거의 일치한다.

#### 4.2 해수의 교환

Fig. 4.3은 관측 유속을 수심 평균하여 시간 단위로 나타낸 것이다. 하루(2조석 주기)동안 만입구를 통하여 유입되는 유량

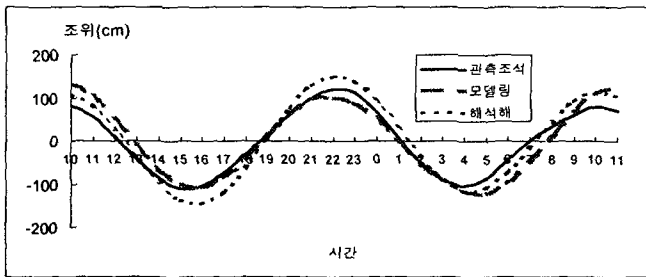


Fig. 4.1 Comparison between observed, modeling and calculated tides

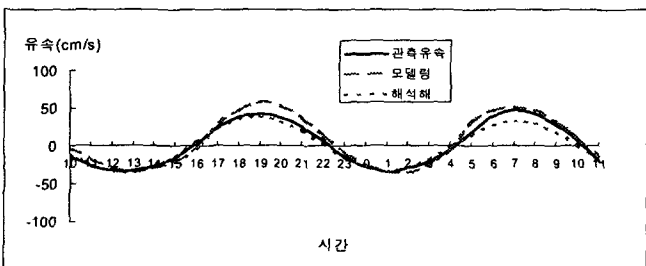


Fig. 4.2 Comparison between observed, modeling and calculated speed

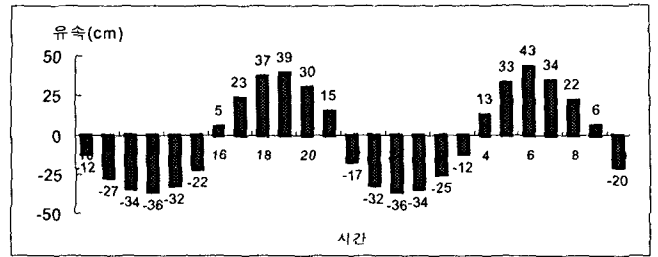


Fig. 4.3 Time series of current speed (point ②)

과 유출되는 유량을 관측된 유속자료를 근거로 하여 유입량과 유출량을 계산해 보면 다음과 같다. 관측 유속은 ②지점에서 실시한 관측 결과를 이용한다. 관측은 입구의 중간 지점에서 실시하였으나 계산의 편의를 위하여 이 지점의 수심평균유속을 단면적 전체의 유속으로 간주하였다.

당항만 입구(②지점)의 저조시의 유수단면적은 7,725m<sup>2</sup> 이므로 조위에 의한 유수단면적의 변화를 고려하여 유량을 계산하면 다음과 같다.

첫번째 조석 주기  $Q_{out} = 45,510 \text{ ton}$   $Q_{in} = 44,990 \text{ ton}$

두번째 조석 주기  $Q_{out} = 45,330 \text{ ton}$   $Q_{in} = 45,230 \text{ ton}$

따라서 2조석 주기동안 당항만 입구를 통하여 유입되는 유량은 총 90,220 ton, 유출되는 유량은 총 90,840 ton으로 추정된다. 하루동안 유출되는 양이 유입되는 양에 비해 약 600톤 많은데 이는 하천이나 생활하수 등으로 당항만 내에 유입되는 담수의 양으로 추정된다.

#### 4.3 최대유속수심

최대유속  $V_{max}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{max} = \sqrt{\frac{3a \left( \frac{a}{\sigma^2} - 1 \right)}{4 \sigma^2 b^2}} \cdot \left( \frac{n_r}{n} \right)^2 \quad (4.7)$$

여기에서  $n$ 은 0.04를 사용했다<sup>9)</sup>.

식(4.2)식을  $k=4V(2g n_r^2 - f_c R^{4/3})/3\pi R^{4/3}$  이용하여  $V$ 에 관하여 정리하고 식(4.7)을 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\beta b}{\sigma^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{9}{4} \left( \frac{a}{\sigma^2} - 1 \right)^2 \left( \frac{a}{\sigma^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{a}{\sigma^2} - 1 \right)^4} \cdot \left( \frac{a}{\sigma^2} \right) \left( \frac{n}{n_r} \right)^2 \quad (4.8)$$

여기에서  $p=4g n^2 T/3 \pi^2 h^{4/3}$  이다.

최대유속수심은 수로전방의 외해조석의 제원으로부터 구할 수 있는데 식(4.8)을 만족시키는  $h$ 를 구하면 된다.

당항만의 경우, 외해진폭을  $a_s$ 로 하고, 조차는  $M_2$ 분조가  $S_2$ ,  $O_1$  및  $K_1$ 조에 비해 탁월하므로 주기로서 다음과 같은 반일주조를 취한다.

$$a_s = 1.58 \text{m}, T = 12 \text{시간}$$

식(4.8)에 위의 값을 대입하여 계산한 결과 당항만 수로에서의 최대유속수심은 7.3m로 추정되며 이는 비교적 안정된 상태이다. 즉, 현재 당항만 수로의 평균 수심은 약 11m 이며 최대 유속수심 7.3m에 이를 때까지 수로에 표사 등 부유물이 퇴적된다 하더라도 최대유속수심 7.3m에 이르게 되면 다시 침식되는 과정을 반복하여 수심 7.3m를 유지할 수 있다.

## 5. 결 론

일부만이 개방되어 있고 선박통항이 빈번한 폐쇄성 연안해역의 해수유동에 관해 연구하였다. 또한 모델링 및 해석해를 통해 해수유동을 예측하였으며 당항만을 대상으로 해수유동 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 조석 관측결과 만입구(②지점)의 진폭 약 140cm, 조차 241cm, 중간지점인 10번 부표지점(③지점)의 진폭 약 130cm, 조차 235cm, 만내측인 ④지점의 진폭 약 125cm, 조차 229cm를 보인다. 만내로 진입할수록 조차는 작아지고 조시는 빨라진다.
- 2) 만입구의 유속관측결과 상층에서는 유출하는 흐름이 대부분이며 중층에서는 유입과 유출을 반복하고 하층에서는 유입하는 흐름이 대부분이다. 최강 창조류는 310°방향으로 47cm/s, 낙조류는 160°방향으로 36cm/s이며 모델링 결과와 거의 일치한다.
- 3) 만입구에서 ③지점까지는 조류의 변화가 심하고 유동이 활발하게 이루어지고 있으나 만내로 진입할수록 조류가 매우 약하며 해수유동이 거의 없다.
- 4) 1차원 해석해는 관측값과 거의 일치하며 최대유속수심은 약 7.3m로 당항만 수로는 안정된 상태를 보인다. 2조석 주기(대략 하루)동안 유입되는 유량은 약 90,220ton, 유

출되는 유량은 약 90,840ton이다.

이 연구결과는 항구, 강 및 폐쇄된 만 등 협소한 지역에서의 해수교환 및 항만 등의 개발시 해양환경에 미치는 영향 평가에 기초자료를 제공할 것으로 본다. 추가로 좀 더 충분한 실험과 관측을 거쳐야 할 필요가 있으며 3차원 흐름 즉, 유속의 연직 분포 및 주변 해역이나 지형 등의 영향을 고려하여 고찰해야 할 것으로 본다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] 국립해양조사원(1999), 조석표.
- [ 2 ] 국립해양조사원(1982, 11), 조류도.
- [ 3 ] 기상청(1982), 기상연보.
- [ 4 ] 한국해양연구원 홈페이지, <http://www.kordi.re.kr>.
- [ 5 ] Dean, D. G. and R. A. Dalrymple(1984), Water wave mechanics for engineers and scientist, pp. 206~283.
- [ 6 ] Rahman, M(1988), Topics in engineering - The hydrodynamics of waves and tides, with applications, pp. 206~245.
- [ 7 ] 마현호(1998), 취송류의 확산 특성에 관한 연구, 한국해양대학교 해사수송과학과 대학원 석사학위 논문, pp. 20~21.
- [ 8 ]樋口明生(1961), 境水道の 水位變動に 關する 模型實驗について, 第8回 海岸工學講演會講演集, pp.119-125.
- [ 9 ] 近藤倣郎(1972), 感潮狹口水路の流速, 内水域潮位および最大流速水深の一解法, 木學會論文報告集, 第206号, pp. 43-57.

원고접수일 : 2002년 04월 30일

원고채택일 : 2002년 06월 10일