

# 제한수로를 임계속도 근방에서 항주하는 선체 주위의 유동특성에 관한 수치해석연구

김성용\*, 이영길\*\*

\*인하대학교 대학원 선박공학과

\*\*인하대학교 선박해양공학과

## Numerical Simulations of Flow Characteristics around a Hull Advancing near the Critical Speed in Restricted Water Conditions

S.Y. Kim\*, Y.G. Lee\*\*

\*Dept. Naval Archi. and Ocean Eng. Graduate school, Inha Univ.

\*\*Dept. Naval Archi. and Ocean Eng. Inha Univ.

### ABSTRACT

본 연구에서는 제한된 수로를 운항하는 선체주위의 유동특성에 관한 연구를 수행하고자 하였다. 일반적으로 운하 또는 하천을 운항하는 선박의 경우 제한된 수심의 영향으로 천수효과가 발생하게 된다. 이러한 천수의 효과와 제한된 폭의 영향으로 선수부분에서 선체보다 선행하는 파도가 전파되어 나아가기도 하며, 이로 인하여 선박은 보다 많은 조파저항을 받게 된다. 본 연구에서는 임의의 형상을 갖는 선체가 폭과 수심이 제한된 운하를 임계속도 근처에서 운항하는 경우에 관하여 폭과 수심을 변화시켜가며 수치계산을 수행하여, 제한수로에서의 임의의 선체주위의 유동특성을 관찰하고자 하였다. 수치계산은 MAC (Marker And Cell)법을 기초로 한 유한차분법 (Finite Difference Method)을 사용하였으며, 계산에 사용된 격자계는 임의의 형상에 관하여 격자생성이 용이한 직사각형 격자계 (Rectangular Grid System)를 사용하였다.

### 1. 서론

선박이 제한수로를 임계속도로 항주하는 경우에 제한된 수심과 수로폭의 영향으로 선수 앞부분에서 선체보다 빠르게 진행되는 파가 주기적으로 발생하게 된다. 이러한 파는 천수의 영향과 Blockage의 영향으로 발생하게 되며 선체에 보다 많은 조파저항을 받게 하고 강한 침하와 종경사를 유발하여 선체가 좌초되기도 한다. 이러한 이유로 제한된 수로를 운항하는 선박을 설계하는 경우 설계속도를 임계속도를 피하여 설계하기도 한다. 이러한 유동현상에 관한 연구는 Thews & Landweber (1953)가 처음으로 수조실험에서 관측한 것으로 알려져 있으며 이밖에도 일본에서는 Izubuchi & Nagasawa (1937) 등이, 독일에서는 Graff (1962) 등이 이러한 현상에 관한 실험적인 연구를 수행하였으나 이러한 현상에 관한 물리적인 설명을 하지 못하였고, 이러한 상황에서 Huang (1982), Ertekin (1984) 등이 일련의 실험을 체계적으로 수행하여 이 문제는 비선형파에 대한 중요한 연구과제가 되기도 하였다. 이론적 연구로는 Wu & Wu (1982)가 처음으로 Generalized Boussinesq (gB) 방정식을 이용하여 수치 계산하였으며, 그 이후로 여러학자들에 의하여 이론적 연구가 수행되기도 하였다.

조선공학의 관점에서는 이러한 비선형과의 특성중 제한수로를 항주하는 선체에 미치는 조파저항의 증가와 선박의 종경사 문제에 관심을 가지게 되며 제한수로에서의 유동특성을 파악하여 제한수로를 운항하는 선박을 설계하는데 참고로 삼기 위함이다. 종래의 수치계산의 경우 포텐셜 기법을 이용하여 자유표면 문제에 관점을 맞추었던 것과는 달리 본 계산에서는 이러한 물리적 현상에 관한 원인을 찾고 그 발생과정에 대한 연구에 관점을 맞추어 계산을 수행하였다.

## 2. 수치계산법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 유동장을 비압축성, 비점성유동이라고 가정하여, 지배방정식들로 보존형의 3차원 Euler equations와 연속방정식을 다음과 같이 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{\partial\phi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{\partial\phi}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial\phi}{\partial z} + g$$

여기서,  $(x, y, z)$  : 직교좌표계  
 $(u, v, w)$  :  $x, y, z$  각 방향의 속도성분  
 $\rho$  : 밀도  
 $g$  : 중력가속도 ( $-9.8 \text{ m/s}^2$ )  
 $\phi$  :  $p/\rho$   
 $p$  : 압력

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

### 2.2 유한차분법

수치계산은 MAC (Marker And Cell)법을 기초로 한 직사각형격자계에서 수행되었다. MAC법은 비선형성이 강한 자유수면변화의 시뮬레이션 및 해석문제에 있어서 효과적인 방법중의 하나임이 여러 논문들에 의하여 입증된 바 있으며, 직사각형격자계는 물체적합격자계와 비교하여 계산의 정도는 다소 떨어지나, 기하학적으로 복잡한 3차원 임의형상주위의 격자구성에 있어서 적용성이 우수하다. 또한, 계산의 정도를 높이기 위하여 격자계의 형태에 있어서 교차격자계 (staggered mesh system)와 가변격자계 (variable mesh system)를 적용하여 계산의 정도를 높이고 계산시간의 효율성을 높이도록 하였다. 계산영역은 배의 반쪽만을 포함하는 유동장으로 구성하였으며, 중앙면에 대칭조건을 부가하여 유동장의 대칭성을 고려하였다. 좌표계로는, 자유수면과 선수 앞 끝단이 만나는 점을 원점으로 하는 직교좌표계를 사용하였으며,  $x, y, z$  방향은 각각 유입속도 방향, 선체의 폭 방향 및 수직방향이다. 지배방정식의 차분화에 있어서는, 대류항을 제외한 나머지 항들은 시간에 대하여 전진차분, 공간에 대하여 2차중심차분으로 정리하였다. 대류항의 차분기법으로는 2차중심차분과 donor cell법을 조합한 hybrid scheme을 적용하였다. 사용된 hybrid scheme의 예를 보이면 다음과 같다.

- Hybrid scheme -

$$\frac{(u^2)_{i+1,j,k} - (u^2)_{i,j,k}}{DX}$$

$$\cong \frac{1}{4} DX \left[ \left\{ (u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{3}{2},j,k})^2 - (u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j,k})^2 \right\} \right. \\ \left. + a \left( (u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{3}{2},j,k})(u_{i+\frac{1}{2},j,k} - u_{i+\frac{3}{2},j,k}) \right. \right. \\ \left. \left. - (u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j,k})(u_{i-\frac{1}{2},j,k} - u_{i+\frac{1}{2},j,k}) \right) \right] \quad (3)$$

단,  $a$  : Combination factor  
 $DX$  :  $X$  방향 속도점들 사이의 거리

계산의 알고리즘에 대한 자세한 설명은 Nishimura, S. & Miyata H. 의 논문에 실려 있다. 계산의 알고리즘을 간략하게 살펴보면. 먼저, 지배방정식으로부터 유도된 압력에 대한 Poisson 방정식을 경계치문제로 풀후, 새로운 압력장으로부터 다음 시간단계에서의 속도장을 운동방정식으로 부터 계산한다. 다음으로, 새로운 속도를 가지고 marker들을 Lagrangian manner로 이동시켜, 자유수면에 새로운 위치를 설정한다. 다시, 각 격자의 중심에서 압력은 새로운 속도와 자유수면 아래서 압력의 Poisson 방정식에 의해 계산되어진다. 이와같은 반복계산은 정상상태에 도달할 때까지 반복된다.

## 2.3 경계조건

### 2.3.1 물체 경계격자 설정

선체표면의 표현에 있어서는,  $XY$ 평면에서는 선분(segment)들의 연속으로 표현된 수선들(water lines)로,  $YZ$ 평면에서는 횡절선들(station lines)로 하나의 격자에서 수직방향의 변화가 무시된 계단상으로 표현된다. 물체 경계격자의 설정은 segment를 포함한 격자들을 찾아내어 유체부분이 차지하는 체적비를 구하고, 이것이 1/4이상인 되는 격자를 물체경계격자로 하며, 1/4미만의 격자는 물체내부격자로 하여,  $XY$ 평면상에 접한 4개의 격자중에 유체격자가 한개 이상 있으면 그것을 물체경계격자로 하게 된다. 이와같이, 모든 격자들은 유체격자, 물체경계격자, 물체내부격자로 분류되며, 각각의 격자에 알맞도록 계산법이 구성되어 있다.

### 2.3.2 물체경계조건

물체경계에서는 free-slip 조건을 적용하였으므로, 물체경계격자에서 다음 3조건을 만족하도록 하였다.

- (1) 물체 표면에 수직방향 속도성분은 0이다.
- (2) 물체 표면에 접한 속도는 물체표면 가까이에서 수직방향으로의 구배를 갖지 않는다.
- (3) 물체 경계격자에서의 발산은 0 이다.

그리고, 물체경계격자에서의 압력 반복계산식은, 유체격자에서 사용하는 SOR(Successive Over Relaxation)법 대신에 free-slip 조건과 연속의 조건을 동시에 만족시키면서, 주위 압력들의 유무에 관계없이 압력 계산이 가능하도록 다음의 식 (5)와 같은 속도압력동시반복법을 사용하였다.

$$\phi_{i,j,k}^{m+1} = \phi_{i,j,k}^m - \frac{\omega}{2\delta \cdot DT} (V_p \cdot n) \quad (5)$$

단,  $m+1, m$  : 반복회수를 표시함

$w$  : SOR의 완화계수

$V_p, n$  : 물체 경계격자에 속한 선분의 중심에서 유체의 속도벡터와 단위 법선벡터

$DT$  : 시간증분

$$\delta = \frac{1}{DX_i} + \frac{1}{DY_j} + \frac{1}{DZ_k} \quad (6)$$

식 (5)에서 압력은  $(V_p \cdot n)$  가 "0"에 가깝게 되었을 경우 수렴하게 되므로, 이는 물체 경계격자에서 유체부분의 발산이 거의 "0"이 되며, 또한 물체의 경계면을 가로지르는 유동이 없다는 것을 의미하게 된다.

### 2.3.3 자유표면조건

자유표면에서 점성응력(viscous stress)과 표면장력(surface tension)의 효과를 무시하고, 자유표면의 위치를  $z = \zeta$ 라 할 때, 이 위치에서 동역학적 조건과 운동학적 조건을 다음의 식 (7), (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_0 \quad (z = \zeta \text{ 에서}) \quad (7)$$

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \quad (8)$$

여기서,  $\phi_0 = \frac{P_0}{\rho}$ ,  $P_0$ 는 대기압이다. 식 (7)의 경계조건과 "irregular star" (11)를 사용하면, 자유표면 근처에서의 압력은 3차원인 경우 다음의 식 (9)에 의해 계산된다. 여기서,  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$ 는 구하고자 하는 압력점과 자유표면, 또는 주위 압력점사이의 거리이다.

$$\begin{aligned} \phi_{i,j,k} &= \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 + \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 + \eta_1 \eta_2 \eta_5 \eta_6} \\ &\times \left\{ \frac{\eta_2 \phi_1 + \eta_1 \phi_2}{\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2)} + \frac{\eta_4 \phi_3 + \eta_3 \phi_4}{\eta_3 \eta_4 (\eta_3 + \eta_4)} \right. \\ &\left. + \frac{\eta_6 \phi_5 + \eta_5 \phi_6}{\eta_5 \eta_6 (\eta_5 + \eta_6)} - \frac{1}{2} R_{i,j,k} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

여기서,  $R_{i,j,k}$ 는 source term으로

$$R_{i,j,k} = \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right)$$

식 (8)에 의해 표현된 운동학적 조건은 자유표면에 놓여진 marker들을 사용하여 만족되어진다. Marker들은 Lagrangian manner로 움직여지며, 이들의 각 시간단계에서의 새로운 위치는 새로운 자유표면을 결정한다.

### 2.3.4 기타 경계조건

유입경계면에서는 속도에 Dirichlet조건을, 압력에 Neumann조건을 적용하였고, 고속선의 중앙면에서는 좌우대칭조건을 적용하였다. 또한, 유출경계면에서는 속도, 압력 모두 Neumann조건을 주었으며 측면경계면, 그리고 저면경계에서는 속도의 경우 Slip 조건을, 압력의 경우 Neumann조건을 주어 수로의 벽과 바닥과 같은 효과를 주도록 하였다.

## 3. 계산결과 및 고찰

수치계산은 입의의 물체가 제한수로를 항주하는 경우를 가정하였다. 계산에 사용된 선체와 제한수로의 조건은 다음과 같다.

- \* Hull Type : Vertical Strut  
 $S(x) = 1 - x^2$
- \* Ship Length : 2.0  
Draft : 0.131
- \* Channel Breadth : 1.0  
Channel Depth : 0.25
- \* Ship Speed :  $F_h = 1.0$   
Blockage Coefficients :  $S_b = 0.105$

계산에 사용된 물체는 횡단면적의 비율이 2차 포물선의 형태로 변하는 수직방향으로 단면의 형상이 동일한 스트럿(strut)의 형상을 가진다. 선체의 길이를 2 라고 하면, 선체의 폭은 0.4, 흘수(draft)는 0.131이다. 이러한 제한수로의 유동현상에 중요한 조건으로 작용하고 있는것은 선체의 속도를 제한수로의 깊이로 무차원화한  $F_h$ , 그리고 수로의 횡단면적과 선체의 최대횡단면적과의 비( $S_b$ )가 된다. 이 계산의 경우  $F_h$ (depth froude number)는 선체주위의 발산파의 각이 최대가 되는 임계속력(critical speed) 1.0의 경우이며,  $S_b$ (blockage coefficient)는 0.105의 경우가 된다. 이러한 경우에 대한 계산은 기존의 계산결과들과 비교가 가능한 경우에 해당하게 된다. 계산조건에 관하여는 Fig.1에서 개략적으로 보여주고 있다. Fig.2 에서는 선체주위의 유동현상과 선수 선행파의 발생과정을 각각의 시간대에 따라 보여주고 있다. 먼저 첫 번째 선수 선행파가 발달하는 시간은 5.22(sec) 이며 시간이 지남에 따라 선체가 진행하는 속도보다 빠르게 진행하는 파가 주기적으로 형성되어지는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 선행파의 경우 시간이 지날수록 파고가 증가하는 경향을 보이며, 반대로 선체의 뒷부분은 파고가 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 선체의 앞부분으로 이동되어진 질량 때문에 반대로 선미부분의 파고가 감소하는 것으로 보이며 물리적으로도 타당한 것으로 생각되어진다. Fig.3 에서는 시간에 따른 수로 벽 부분에서의 파형을 2차원으로 보여주고 있다. 그림에서 선체의 앞부분에서 파가 주기적으로 발생되고 있으며 물체의 뒷부분의 수심은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 제한수로를 운항하는 선체의 급격한 침하와 종경사를 유발할 수 있으며 좌초의 위험성을 나타내기도 한다. 다음으로 Fig.4 에서는 선체의 표면에서의 압력저항을 적분한 계수값을 보여주고 있다. 이 곡선은 선체에 작용하는 압력을 나타낸 것으로 주기적으로 파가 발생됨에 따라 압력이 주기적으로 변화함을 볼 수 있다. 계수값이 증가하는 부분은 Fig.3에서 선수부분에 파도가 형성된 상태와 동일한 주기로 나타나고 있다. Table 1 에서는 주기적으로 발생하는 파의 파고와 전파속도, 주기에 관하여 다른 계산결과들과 비교하고 있다. 먼저 파고를 살펴보면 다른 계산의 경우들보다 약간 적은 값을 나타내고 있으며, 이러한 현상의 원인은 선체의 중앙횡단면의 형상과 수선면에서의 선체의 폭의 차이에 기인한다고 생각되어진다. 파도의 전파속도의 경우 다른 계산의 경우보다 약간 적은 값을 나타내고 있으며, 파의 발생주기는 다른 경우보다 느린 것을 볼 수 있다. 이러한 결과의 차이

는 수치계산방법의 차이와 단면형상의 차이에서 기인한다고 생각되어진다. 다음으로 Fig. 5 에서는 선체의 길이방향 중앙대칭면과 수로의 벽면에서 압력분포를 보여주고 있다. 전체적으로 제한된 수심의 영향으로 선체 후반부 아랫부분에서 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 시간에 따른 압력분포를 살펴보면 첫 번째 파가 발달하는 동안 선체의 앞부분의 압력은 꾸준히 증가하며, 선체로 인해 발생한 파도가 수로의 벽쪽으로 전파될수록 수로의 벽면에서 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또 한편으로는 선체와 수로의 바닥면 사이의 부분에서 압력이 양(+)의 값을 가지는 부분이 증가한다. 이러한 이유로 선체의 앞부분과 선체와 수로바닥사이에서의 유체의 속도는 감소하며, 이러한 과정을 통해서 선체의 앞부분에 질량이 점점 증가하게 되어 파고가 증가한다. 이러한 상태가 지나면 수로의 벽면의 그림에서 보는 바와 같이 선체에서 발생하는 파도에 의하여 높아졌던 수로벽에서 길이방향으로 선체에 해당하는 부분에서의 유체속도가 증가하고 파고가 낮아지면서 수로벽의 압력이 높은 부분이 선체보다 빠른속도로 앞쪽으로 진행하게 된다. 이러한 현상은 선행파가 주기적으로 발생할 때마다 반복되어진다. 앞으로 개선되어야 할 부분은 선체의 앞부분의 유동현상뿐만 아니라 선체의 뒷부분에서 형성되어지는 비선형파에 관한 보다 개선된 계산이 필요하다고 생각되어진다. 본 계산은 수조실험이 용이하지 않은 물리적 현상에 관한 고찰이 가능하였으며 수치계산조직이 물리적 현상에 고찰에 유용한 도구가 될 수 있음을 알 수 있었다. 앞으로는 본 계산에서 행하여진 물리적 현상에 관한 보다 체계적이고 일괄적인 계산이 필요하다고 생각되어진다.

#### 4. 결 언

- 1) 본 논문에서는 제한수로에서 임의의 물체가 진행할 때의 수로내의 유동특성에 관하여 수치해석적 연구가 가능하였다.
- 2) 수치계산은 다른 계산들과 비교하여 타당한 결과들을 얻었으며, 자유표면 문제뿐만 아니라 제한수로내의 유동특성에 관하여 고찰되어질 수 있었다.
- 3) 본 계산결과로써 수치계산조직이 실험적 연구가 어려운 제한수로내에서의 유동현상을 해석하는데 있어서 보다 유용한 결과들을 얻을 수 있었다.
- 4) 실제적인 물리적 현상을 보다 더 정도 높게 계산을 수행하기 위하여는 수치계산조직의 부분적 개선이 필요할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) "The Ship in River-Sea through Traffic" , 15th Duisburg Colloquium on Shipping and Ocean Technology, The Shipping Technology Faculty of Duisburg University, Germany.
- (2) Nishimura S., and Miyata H., "Finite Difference of Nonlinear Ship Waves by the TUMMAC\_IV Method and Its Application to Hull-Form Design" , J. soc. Nav. Archit. Jpn Vol 157, 1985.
- (3) Lee Y. -G., Miyata H. and Kajitani H., "Some Application of the TUMMAC Method to 3D Water-Wave Problem", J. Soc. Naval Archit. Korea, Vol. 25, No. 4, Dec., 1988.
- (4) 정승규, 이승희, 이영길, 홍성완, "유한차분법을 이용한 쌍동선 선형주위의 유동장 해석", 대한조선학회 1995년도 춘계연구발표회 논문집, 1995,
- (5) 김성용, 이영길, 이승희, 이규열, 김호은, "연안 및 운하 연계수송용 Pusher-Barge

System을 위한 선형연구”, 대한조선학회 춘계연구발표회 논문집, 1997

- [6] Ertekin, R. C; Webster, W. C. and Wehausen, J. V., "Ship-Generated Solitons" Proc. 15Th. Symposium on Naval HydroDynamics, Hamburg, PP.347-361, 1984, National Academy Press, 1984
- [7] 최항순, "제한수로를 임계속도로 항진하는 선박의 조파저항, 침하 및 종경사에 대한 비선형 해석", 대한조선학회 논문집, Vol. 26, No. 4, pp. 3-13, 1989

Table 1 Comparisons of Wave Amplitude, Propagation Speed and Periods

	$A / h$	$c / \sqrt{gh}$	$UTg/h$
Bai	0.553	1.24	30.0
Ertekin	0.624	1.28	29.6
Choi	0.562	1.28	28.8
Present	0.480	1.22	30.1

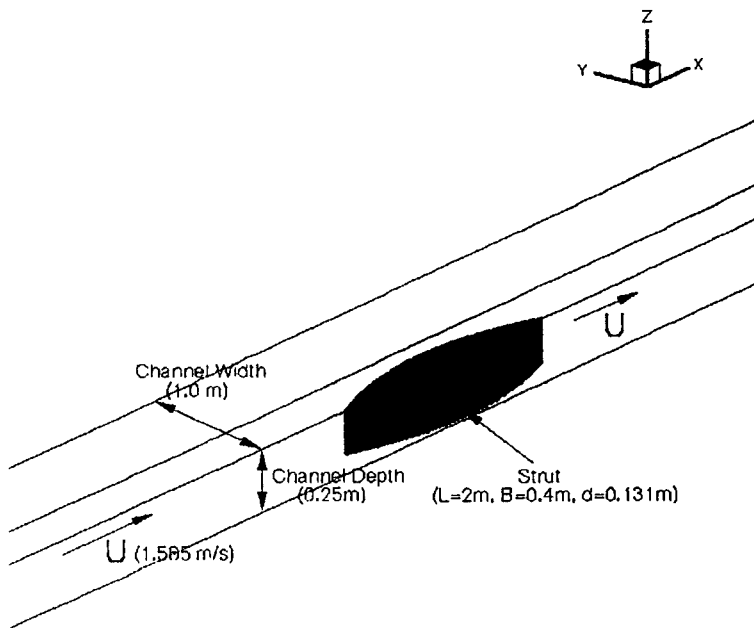


Fig. 1 Schematic Drawing of Computational Condition

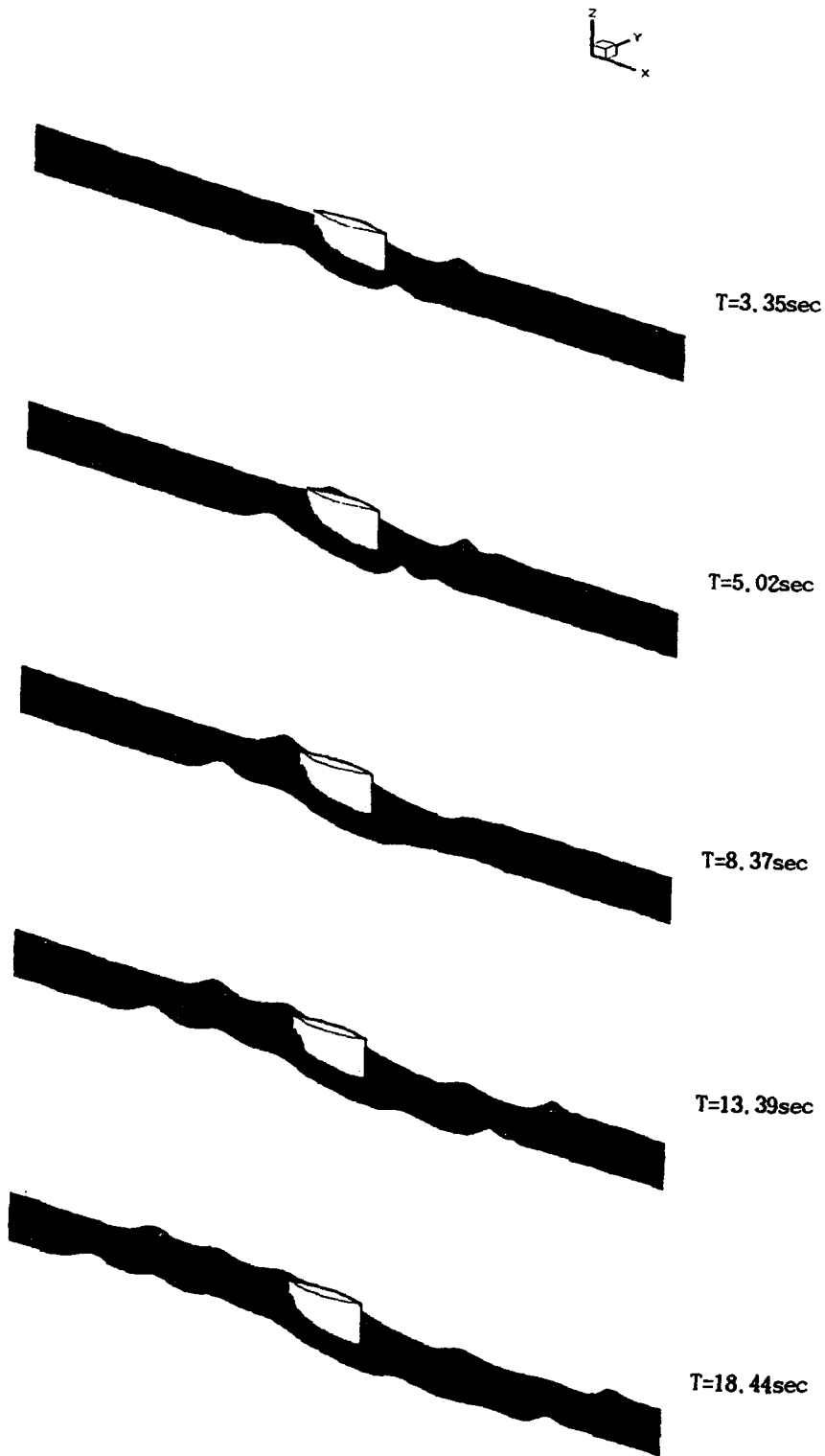
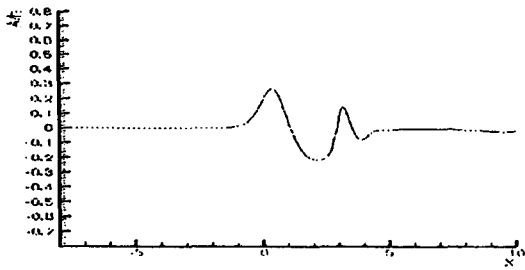
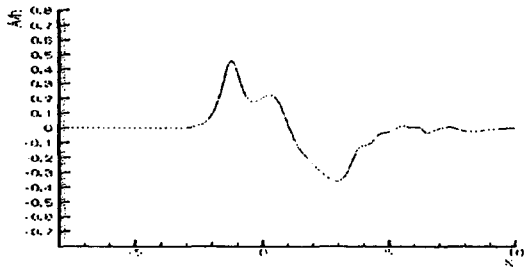


Fig. 2 Evolution of Wave Field Generated by Strut

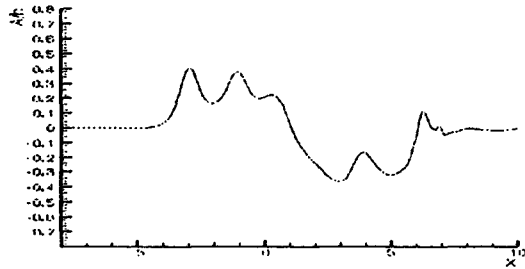




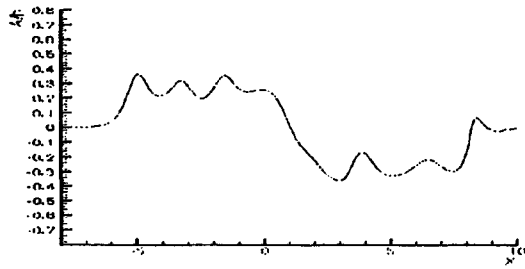
T=3.35sec



T=8.37sec



T=13.39sec



T=18.41sec

Fig. 3 Wave Height Profiles

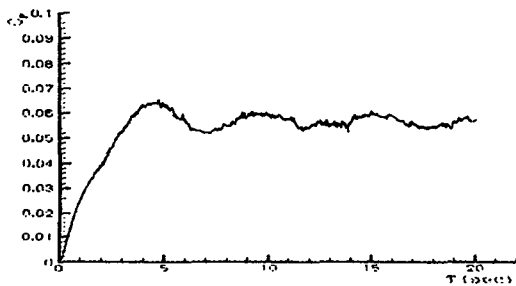


Fig. 4 Time History of Pressure  
Resistance Coefficients

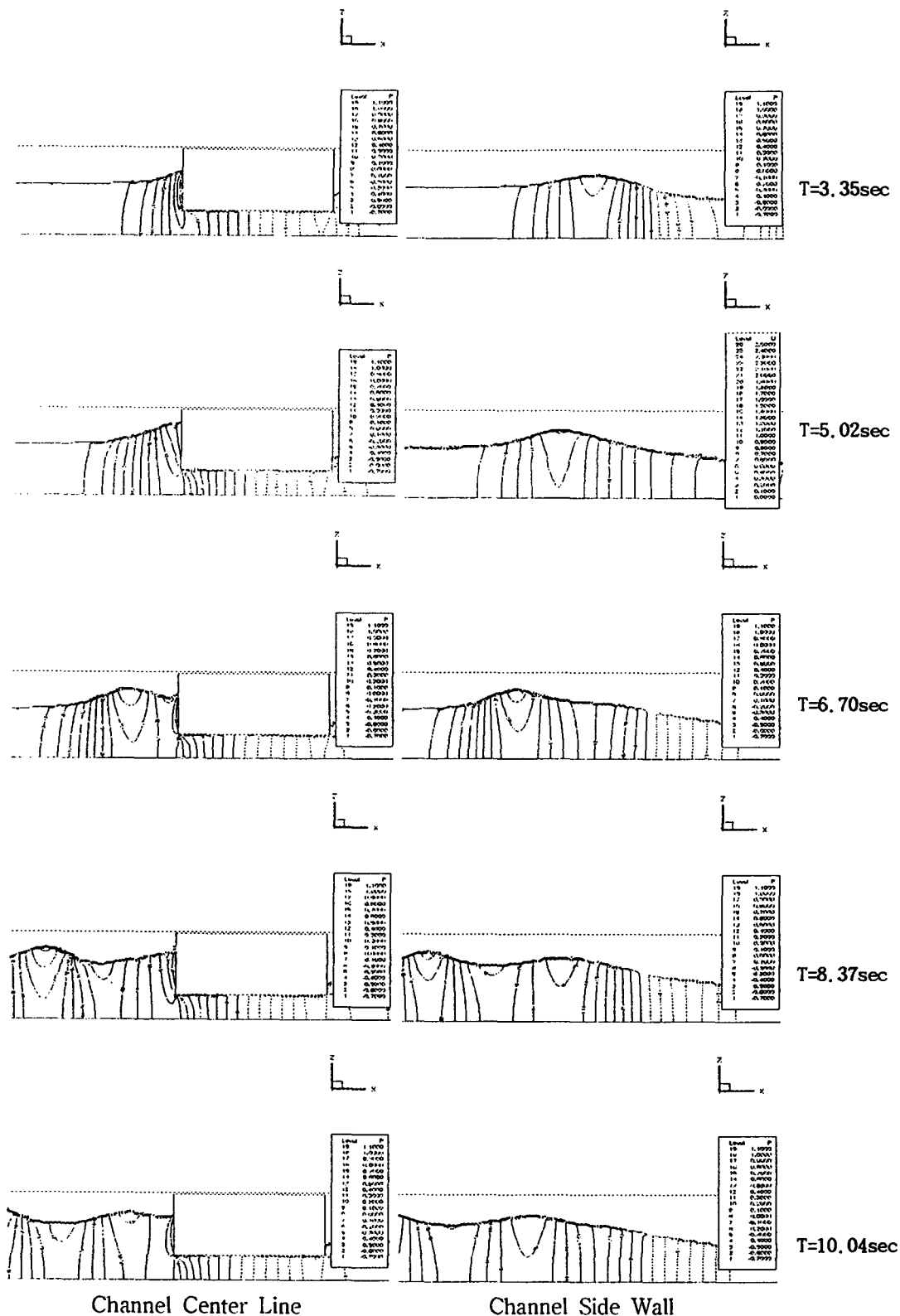


Fig.5 Pressure Contours at Center Line and Side Wall