

복잡한 해면효과익선 계산 모형 주위의 3차원 유동장의 수치계산

Three-Dimensional Flow Simulations around a Numerical Model of
Wing-In-Ground(WIG) Effect Ship having the complex geometry

박 중천 ○, 신 명수

한국기계연구원 선박·해양공학연구소

Jong-Chun PARK, Myung-Soo SHIN
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

Summary

Numerical simulations are made for the three-dimensional flow around a wing in ground effect craft having the complex geometry. A numerical tool is developed for the primary design of hull and wing shape of practical Wing-In-Ground effect(WIG) ship. The finite-difference method is utilized to discretize the governing equations and pressure field is obtained by using Marker-And-Cell(MAC) method. The air and water flows are simultaneously simulated in the time-marching solution procedure for the Navier-Stokes equation. The porosity technique and the density function are devised for the implementation of the three-dimensional body-boundary and the free-surface conditions, respectively. In this paper, a craft is modeled simply by three blocks containing a wing mounted on a main body horizontally, with the endplate. The numerical calculations of a WIG advancing in a calm water are performed and the WIG-generated wave profiles are also obtained. In the final paper, details of the numerical methods employed for the present study and calculated results are discussed.

1. 서 언

현재의 국제화물 수송은 선박과 항공기가 주류를 이루고 있으나, 항공기의 경우 대량화물의 수송에 비경제적이고 선박의 경우에는 화물의 운송 시간이 많이 소요된다. 이에, 선박과 항공기의 중간적 입장을 취할 수 있는 시속 300~500 km/h의 차세대 해면효과익선의 개발이 국내에서도 큰 관심을 모으고 있다. 해면효과익선은 항공기의 형태로, 수면 근처를 항주할 때 표면효과(ground effect)에 의해 얻어지는 양·항비의 증가로 비교적 경제적이고 고속으로 운항할 수 있다.

이러한 해면효과익선에 대한 연구는 러시아, 독일, 중국 및 일본 등 조선 선진국의 여러 나라에서 활발히 진행되고 있으며, 최근 국내에서도 4대 조선업체와 한국기계연구원 선박·해양공학연구소(KRISO)가 컨소시엄을 구성하여 본격적인 해면효과익선의 연구와 시험선 제작에 착수하였으며, 이와는 별도로 원격 무인 해면효과익 시험선 제작 및 시운전[1,2], 날개의 풍동 실험[3,4]과 수치계산[5,6,7,8] 등 해면효과익선에 대한 연구가 진척되고 있는 상황이다.

본 연구에서는, 단순한 날개형상이 아닌 복잡한 3차원 해면효과익선을 대상으로 그 주위의 유동장 특성을 파악하기 위해 수치계산을 행한다. 지금까지 연구가 보고된 단순한 날개단면의 형상이 아니라 타원형의 본체에 주익과 날개 끝단면의 부가물이 부착

된 형상을 취하며, 지면조건에 자유표면 조건을 직접 적용한다. 문제에 대한 단순성을 부여하기 위해 복잡한 3차원의 해면효과익선을 단순한 수식선형으로 표현하였다. 사용한 계산방법은 MAC법에 기초한 TUMMAC-VIII 유한차분법[9,10,11,12]이며, 본 연구의 목적에 맞게 프로그램 코오드의 개량에 성공했다. 2층류 계산을 행하는 본 방법은, 일정한 속도로 수면위를 항주하는 해면효과익선의 유체력과 그 주위의 유동장 특성 및 그가 만드는 파형 등이 계산 가능하다.

2. 계산의 전처리 과정 (pre-process)

2.1 단순한 수식 해면효과익선 계산 모형

복잡한 3차원 해면효과익 선형을 단순화시키기 위하여, 해면효과익선 모형 전체가 식(1)과 같이 간단한 수식의 球狀形(sphere, Fig.1) 형태로 몸체를 구성하고 있다고 가정하면, Fig.2과 같은 단순한 수식 해면효과익선 계산 모형의 표현이 가능하다.

$$\text{upper part} ; \frac{x^2}{A_U^2} + \frac{y^2}{B_U^2} + \frac{z^2}{C_U^2} = 1, \quad (1a)$$

$$\text{lower part} ; \frac{x^2}{A_L^2} + \frac{y^2}{B_L^2} + \frac{z^2}{C_L^2} = 1. \quad (1b)$$

여기서, 상수 A, B, C 의 밑첨자 U 와 L 은 해면효과익선의 상하 비대칭성을 고려하기 위한 것이다.

2.2 격자계 및 복잡한 3차원 임의 형상물체의 표현

본 연구에서는, 여러 부가물이 부착된 복잡한 물체 주위의 유동장을 수치계산하기 위하여, 직각격자계를 채용하며, 계산의 정도와 능률을 향상시키기 위하여 세 방향 모두 부등간격 격자를 이용한다.

복잡한 3차원 임의형상 물체의 표현에, 하나의 격자에 유체가 점유하는 비율인 점유비(porosity) γ 라는 스칼라양을 이용한다[13,14]. 따라서, 점유비의 생성은, 본 과정에서 필요로 하는 물체표면까지의 길이 계산과 함께, 수치계산의 전처리 과정에서 행하여지며, 본 과정에서의 입력 데이터로 주어지게 된다.

점유비는, 해면효과익선의 몸체를 식(1)로 표현된 각 부재들에 대해 별도로 생성시킨 다음, 나중에 이들을 합성하는 방식을 택한다[15].

3. 계산의 본 과정 (main-process)

3.1 TUMMAC-VIII 유한차분법

3.1.1 계산법 및 알고리즘

두 층에 있어서, 두 종류의 유체가 각각 일정한 밀도를 갖고, 비압축성이며, 연속적이라고 가정하면, 지배방정식은 이하에 표시하는 2층류에 관한 비압축성의 연속의 식과 Navier-Stokes 방정식이 된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho^{(1)}} \nabla p + \mathbf{a}^{(1)} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho^{(2)}} \nabla p + \mathbf{a}^{(2)} \quad (3b)$$

단,

$$\mathbf{a} = \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (4)$$

여기서, 윗첨자 <1> 과 <2> 는 자유표면의 하부와 상부의 유체를 각각 표시한다. 본 연구에서, <1> 은 자유표면 아래의 물, <2> 는 그 위의 공기로 각각 가정한다. ∇ 는 gradient operator, \mathbf{u} 는 속도벡터, p 는 압력, t 는 시간, ν 는 동점성계수, \mathbf{f} 는 중력항을 포함한 외력항이다.

기본적인 해의 알고리즘은 MAC법에 기초한 TUMMAC-VIII 유한차분법[9,10,11,12]이며, 물과 공기에 대해서 식(3a), (3b)를 각각 푸는 2층류 계산을 행하고 있다.

두 유체는 자유표면을 경계로, 상하로 나뉘어져 있다고 가정하며, 상술한 지배방정식의 해는, time-marching 과정의 매 시간 스텝에서 각 유체영역에

있어서 분리적으로 행함으로써 얻어질 수 있다. 이때, 밀도 ρ 는 각 층에 있어서 일정하다고 가정한다.

자유표면의 형상은, 자유표면의 역학적 조건과 운동학적 조건에 의해 결정된다.

3.1.2 자유표면의 조건

자유표면 운동에 물의 중력적 작용이 거의 지배적일 경우, 자유표면상의 점성응력과 표면장력이 무시된다고 가정하면[16], 자유표면에 관한 역학적 조건과 운동학적 조건은 다음과 같다.

$$p^{(1)} = p^{(2)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + u \frac{\partial M_p}{\partial x} + v \frac{\partial M_p}{\partial y} + w \frac{\partial M_p}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

여기서, M_p 는 밀도함수(density-function), u, v, w 는 x, y, z 방향에 있어서의 속도 성분이다. 식(6)은 자유표면상의 유체입자는 자유표면의 운동 후에도 자유표면에 존재한다는 것을 의미하는데, 파의 overturning이나 쇄파운동과 같은 비선형성이 강한 3차원 자유표면 운동에도 적합한 수송방정식을 나타낸다[9,10,11,12].

식(6)의 차분에는, 시간미분항에 2차정도의 Adams-Bashforth법을, 공간차분에 대해서는 flux-split법의 MUSCL과 같은 3차정도의 상류차분을 이용한다.

한편, 자유표면의 역학적 조건인 식(5)는, 압력의 Poisson 방정식의 해를 구하는 단계에서 Chan & Street(1970)의 "irregular star" 법에 의해서 만족시킨다.

자유표면 경계상에서의 속도는, 다른 층에 경계조건이 되도록 외삽되어져야 하며, 자유표면의 법선방향에 제로 구배가 되도록 근사적으로 외삽한다[10,11].

3.1.3 3차원 임의형상 물체의 경계조건

2.2절에서 잠시 언급한 바와 같이, 복잡한 3차원 임의형상 물체를 표현하기 위해, 하나의 격자에 유체가 점유하는 비율인 점유비 γ 라는 스칼라양을 이용한다. 단, γ 는 $0 \leq \gamma \leq 1$ 의 값을 취하고, 격자의 flagging 또는 차분근사에 필요한 다리의 길이의 계산등, 물체표면의 no-slip 조건의 처리에 사용하게 된다. 또한, 물체표면에 수직한 단위법선 벡터는, Fig.3에서와 같이 주변 격자의 점유비에 의해 근사적으로 어렵잡는다.

3.1.4 그 밖의 경계조건

유입경계에서는, 경계 격자에서 적당한 속도분포를

고정적으로 부과하게 되며, 이로 인해 균일류나 조파를 행하게 된다. 유출경계는, 반사파의 영향을 최대한 줄일 수 있도록 부가영역과 damping scheme [9]을 적용한다. 천정과 바다조건은, 자유표면 근방에서의 유체운동이 수치구조의 천정과 바다에 영향을 미치지 않도록 자유표면으로부터 충분히 떨어지도록 설정하고, 각 물리량은 범선구배가 영이 되도록 의상한다. 계산은, 해면효과익선의 반쪽 부분에 대해 행하며, 대칭조건의 중앙선 조건을 적용하고, 개경계에 대해서는 각 물리량의 범선구배가 영이 되는 의상을 행한다.

3.2 계산 조건

식(1)에서 모형의 형상을 결정하는 상수들은 다음과 같이 설정 한다.

main body	wing	endplate
$A_U = 3.00$	$A_U = 1.80$	$A_U = 2.00$
$B_U = 0.50$	$B_U = 2.40$	$B_U = 0.15$
$C_U = 0.50$	$C_U = 0.20$	$C_U = 0.30$
$A_L = 0.6A_U$	$A_L = 0.6A_U$	$A_L = A_U$
$B_L = 0.6B_U$	$B_L = 0.6B_U$	$B_L = B_U$
$C_L = 0.6C_U$	$C_L = 0.6C_U$	$C_L = C_U$

여기서, 각각의 단위는 m 이다. 이때, 동체와 날개의 받음각은, 본 연구에서 문제의 단순화를 위해 0° 로 설정하며, 실제 해면효과익선의 지면효과에 대한 기대는 하지 않기로 한다. 계수들의 결정에 의해 각 계산 격자에서의 점유비가 생성되며, 이 점유비에 의해 표현되는 모형의 개략적인 모양은 Fig.4에 보여준다. 단, 그림에서는 물체의 경계면이라고 가정 한 점유비 $\gamma=0.5$ 의 등치면(iso-surface)을 선분으로 표시하고 있다.

격자간격은 $\Delta x=0.15, \Delta y=0.06, \Delta z=0.05(m)$ 이며, 시간간격은 $\Delta t=0.0016(sec)$ 이다. 계산영역은 다음과 같다.

x-direction (+added zone)	-6.0 ~ 10.5 (+10.0) m
y-direction	0.0 ~ 6.5 m
z-direction	-1.5 ~ 3.35 m

총 사용 격자 수는 $121 \times 106 \times 66$ (cells)이고, 실행 file의 용량은 약 80MB이다.

유입경계에서 균일류의 입사속도는 실선에서의 속도 약 $90km/h$ 를 가정하여 $U_{flow}=7.9m/s$ 로 설정하고, 균일류의 가속은 6초간 실시한다. Reynolds수는 4.0×10^4 으로 풍동실험[3,4]의 조건보다 낮은 층류로 가정한다. 또한, 정수면부터 날개 끝단판의 밑면까지의 고도(h)와 주익의 길이(c)와의 비인 고도비(h/c)는 0.056, 0.194의 두가지 경우에 대해 계산

을 수행한다.

4. 계산의 후처리 과정 (post-process)

4.1 유체력의 산정방법 및 그 시간 변동

본 연구에서 항력과 양력 계수는 다음과 같이, 날개의 길이 방향의 투영면적 $A_{max}=3.6 \times 2.4(m^2)$ 와 균일류의 설정속도 U_{flow} 로 무차원화한다.

$$C_D = \frac{F_{x,cal}}{1/2 U_{flow}^2 A_{max}} \quad (7)$$

$$C_L = \frac{F_{z,cal}}{1/2 U_{flow}^2 A_{max}} \quad (8)$$

단, F_{cal} 은 계산에서 압력을 적분하여 얻어진 힘을 나타낸다.

Fig.5에는, 양·항력 계수의 시간변동을 표시한다. 항주시간 8초 이후의 각 계수들은 대체로 안정되어 있고, 고도비 변화에 따른 차이가 뚜렷이 보인다. 항력의 경우, 고도비가 낮아짐에 따라 계수의 증가 성향이 보이고, 양력의 경우, 날개의 받음각 0° 의 설정에 의해 상대적으로 영에 가까운 값을 표시하지만, 고도비가 낮은 경우 미소한 음의 변화를 보인다. 즉, 미소한 하방향의 힘(down force)이 작용하고 있음을 알 수 있는데, 자동차와 같은 운송체가 지면 가까이에서 달리는 경우에 이와 같은 힘이 나타나게 된다[17].

4.2 계산 결과의 가시화

유체력의 시간변동 특성과 함께, 유동장의 특성을 관찰하기 위한 계산결과의 가시화는 중요한 후처리 과정이 된다. 본 연구와 같은 3차원 계산의 경우, 유동장을 한눈에 살피기 곤란하므로, Fig.6과 같이 특정 단면별로 가시화하기로 한다. Fig.6에서 단면 A는 동체의 중심선상의 단면이며, 단면B는 동체와 주익의 연결부분, 단면C는 주익의 중앙부, 단면D는 주익과 날개 끝단판의 연결부분, 단면E는 날개 끝단판의 중앙부, 그리고 단면F는 날개 끝단판의 외측면을 각각 나타낸다. 여기서, 단면B, 단면C, 단면D는 같은 날개 단면을 갖는다.

먼저, 유동장의 개략적인 특성을 파악하기 위해 시각 $t=12.8(sec)$ 에서의 속도 벡터 분포와 순간 유선도를 Fig.7에 표시한다. 단면A에서, 동체 상면의 흐름은 비교적 온화한 반면, 동체 하면의 후류에서는 흐름이 상하 유동적이며, 특히 자유표면과의 상호작용이 강한 고도비가 낮은 경우는 유체의 회전운동이 보여진다. 단면B에서는, 날개 상부의 흐름이 날개 하부의 흐름에 비해 상대적으로 복잡하게 나타나는데, 단면B는 동체와 주익의 접합된 부분으로,

동체로부터의 흐름과 주익주위의 흐름이 상호 간섭하기 때문에 복잡한 유동장을 형성하고 있다고 생각할 수 있다. 단면C에서는, 단면B에 비해 흐름이 다소 완화되어 있지만, 날개 상부로부터 하류에 걸쳐 흐름의 복잡한 유동성이 표시되고 있다. 날개 끝단판이 부착되는 단면D와 날개 끝단판의 중심선 부분인 단면E에서는 비교적 온화한 흐름이 보여지며, 날개 끝단판의 외측면인 단면F에서는 날개 끝단판의 흐름에 다소 동요되는 듯한 모습을 보이지만, 비교적 완만하다.

Fig.8과 Fig.9에는, Fig.7에서와 같은 시각의 압력과 횡방향에 축을 갖는 와류성분(ω_y)의 분포를 각 단면 별로 표시한다. 단, Fig.8과 Fig.9에서는 자유 표면 하부의 흐름장은 생략한다. 전체적으로 고도비에 따른 압력장의 상이한 분포가 명확하게 나타나 있다. 물체 상부의 상류측에서는 고도비 변화에 관계없이 압력분포가 거의 유사하지만, 물체 상부의 후류와 물체의 하부에서의 압력분포는 고도비 변화에 따라 현저한 차를 보이고 있다. 날개의 받음각이 0° 로 설정되어져 있기 때문에 물체의 상부와 하부의 압력차가 거의 보이지 않으며, 이로 인해 양력이 증가하는 지면효과는 기대할 수 없다. 한편, 흐름의 하류에서 와류의 방출에 의해 압력분포가 복잡하게 나타나 있으며, 고도비가 낮은 경우에는 물체의 후미로부터 방출된 와류가 자유표면 부근에서 복잡하게 상호 간섭하고 있는 모습이 보여진다.

Fig.10에는 정수중을 항주하는 해면효과익선이 만드는 파형분포를, Fig.11에는 3차원적인 파형의 모양을 각각 표시한다. 단, Fig.11의 파고는 5000배 확대한 것임을 표기해 둔다. 고도비가 낮은 경우, 해면효과익선의 후류에서는 물체에서 방출된 와류의 자유표면과의 상호 간섭에 의해 복잡한 파형이 관측되며, 날개 끝단판에 의해 횡방향에의 파의 발산이 억제되어지고 있는 것을 볼 수 있다.

5. 결 언

본 연구에서는, 복잡한 3차원의 해면효과익선을 단순한 계산 수식선형으로 표현하여, 그 주위의 유동장을 MAC법에 기초한 TUMMAC-VIII 유한차분법에 의해 푸는데 성공했다. 2중류 계산을 행하는 본 방법은, 일정한 속도로 정수면위를 항주하는 해면효과익선의 유체력과 주위의 유동장 특성 및 그가 만드는 파형 등이 계산 가능하였으며, 가까운 장래에 계산 예정 중인, 파랑중에서 항주하는 실제 형상의 해면효과익선의 시간변화에 따른 유체력의 특성과 함께 해면효과익선 설계에 기초적인 정보를 제공할 것이다.

- [1] 김 상근 외(1995) : "WIG선 해면의 기초연구", '95 초고속선 Workshop 논문집, 선박·해양공학연구소.
- [2] 정 광효 외(1995) : "해면효과익의 실험적 연구와 PARWIG선의 설계 및 제작", 대한조선학회 추계 연구발표회, 충남대학교, 대전.
- [3] 김 상근, 김 진현, 서 성부(1995) : "WIG선의 해면의 풍동실험 고찰", 대한조선학회 추계 연구발표회, 충남대학교, 대전.
- [4] 전 호환(1996) : "날개의 지면효과에 관한 풍동시험 결과", 제2차 KTTC 고속정 분과 Workshop, 현대중공업, 울산.
- [5] 박 일룡, 전 호환, 정 정환(1995) : "3차원 해면효과익의 정상 및 비정상 성능 해석", 대한조선학회 추계 연구발표회, 충남대학교, 대전.
- [6] 정 세민, 이 영길, 이 승희(1995) : "2차원 표면효과익의 주위 유동장의 수치 계산", 대한조선학회 추계 연구발표회, 충남대학교, 대전.
- [7] 윤 범상, 김 연규(1995) : "WIG주위의 점성 유동 특성에 관한 기초연구", 대한조선학회 추계 연구발표회, 충남대학교, 대전.
- [8] 김 우전, 신 명수(1996) : "표면 효과익 주위의 난류 유동 계산", 대한조선학회 춘계 연구발표회, 삼성중공업, 거제도.
- [9] Park, J.-C. et al.(1993) : J. Soc. Naval Arch. Japan, vol. 173.
- [10] Park, J.-C. & Miyata, H.(1994a) : ASME, FED-Vol. 181, Free-Surface Turbulence.
- [11] Park, J.-C. & Miyata, H.(1994b) : J. Soc. Naval Arch. Japan, vol. 176 (Japanese).
- [12] Miyata, H. & Park, J.-C.(1995) : Advances in Fluid Mechanics, Potential Flow of Fluids, Computational Mechanics Publications, Boston.
- [13] Miyata, H. & Yamada, Y.(1992) : Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 14.
- [14] Park, J.-C. et al.(1992) : Proc. 19th Symp. Naval Hydrodynamics, Seoul, XII.
- [15] Park, J.-C.(1994) : "A computational study of three-dimensional nonlinear waves caused by breaking waves", Doctoral Thesis, University of Tokyo (Japanese).
- [16] Nichols, B.D. & Hirt, C.W.(1971) : J. Comput. Phys., Vol. 8.
- [17] Kanai, M. et al.(1991) : "Hydrodynamical forces on a moving body in ground effect", J. Soc. Naval Arch. Japan, vol. 170 (Japanese).

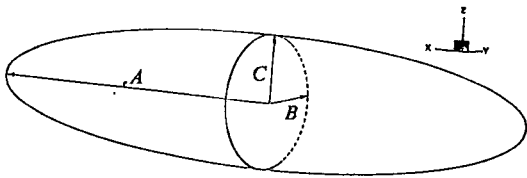


Fig.1 A spheroid.

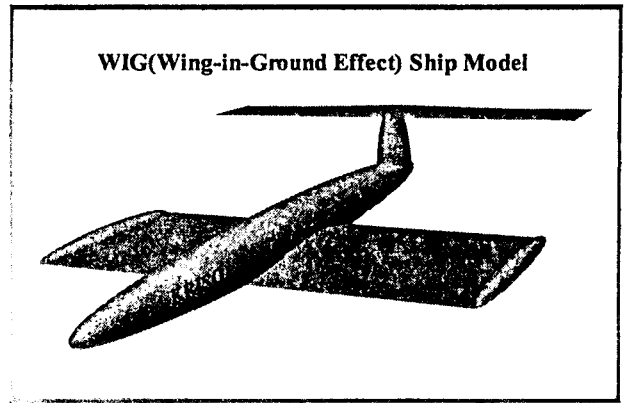


Fig.2 A simplified model of WIG ship.

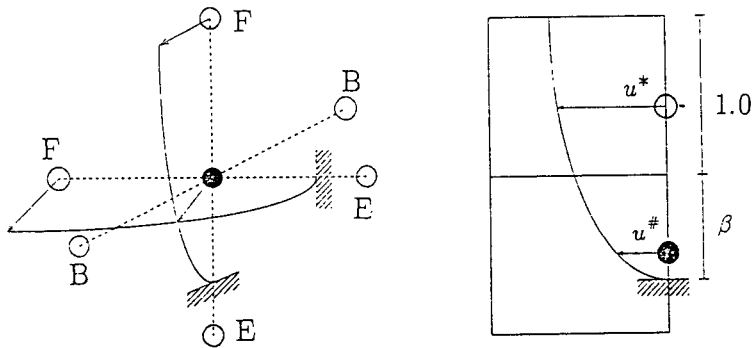


Fig.3 Schematic sketch of velocity extrapolation on the body-surface by using the porosity technique.

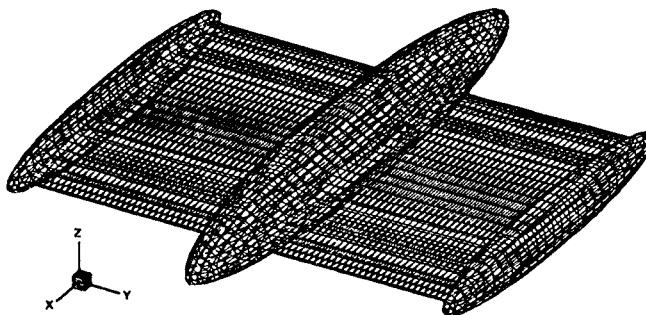


Fig.4 A numerical model of WIG ship presented by porosity $\gamma=0.5$.

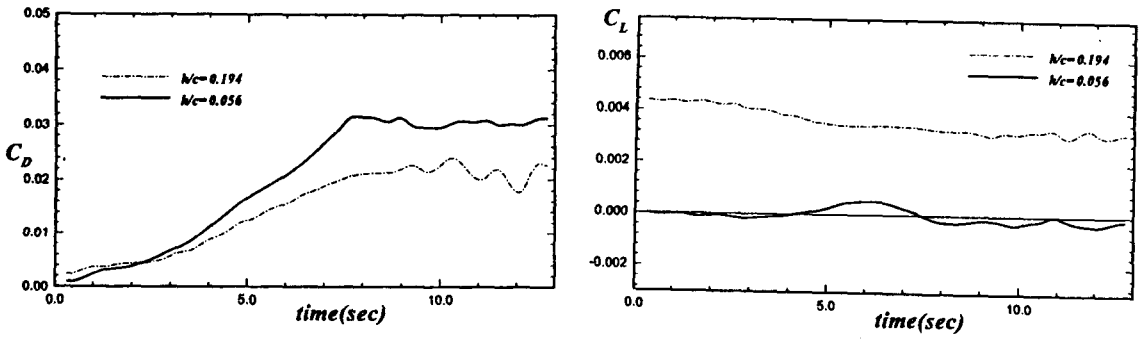


Fig.5 Time histories of calculated drag(left) and lift(right) coefficients.

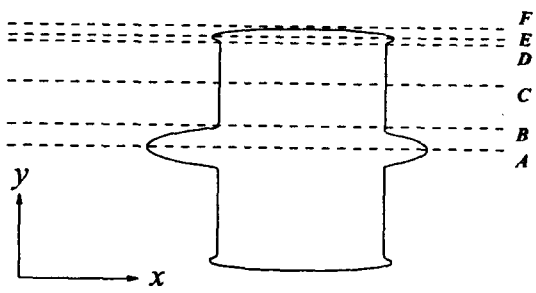


Fig.6 Sectional divisions.

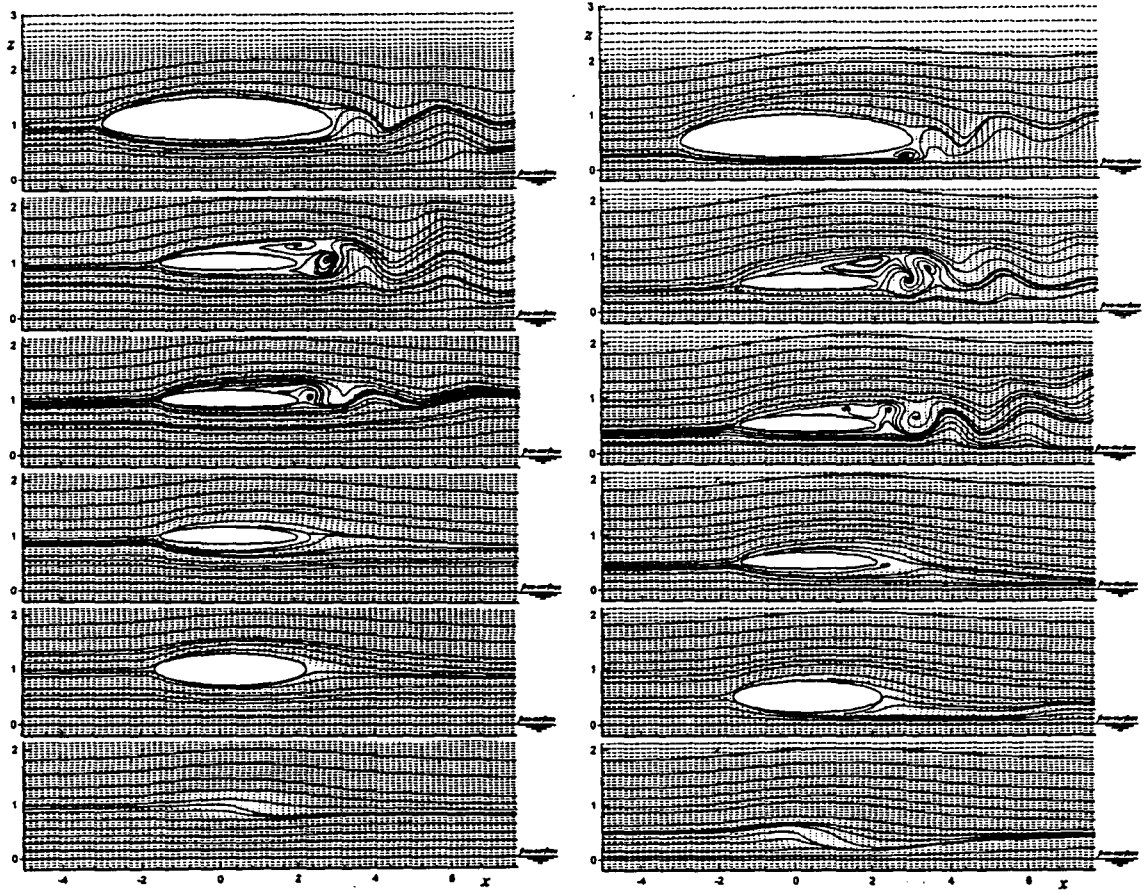


Fig.7 Velocity vector fields and limit streamlines fields on the vertical plane A~F(from above) in Fig.6, $h/c=0.194$ and $h/c=0.056$ from left.

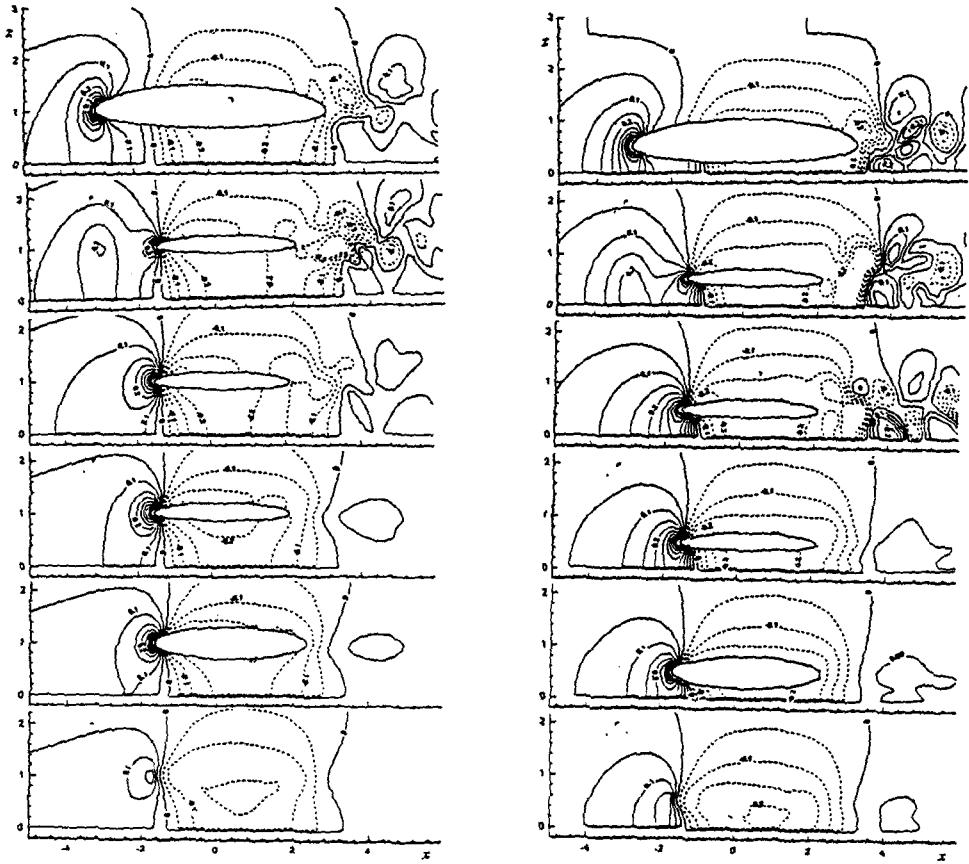


Fig.8 Pressure fields and limit streamlines fields on the vertical plane A~F(from above) in Fig.6, $h/c=0.194$ and $h/c=0.056$ from left.

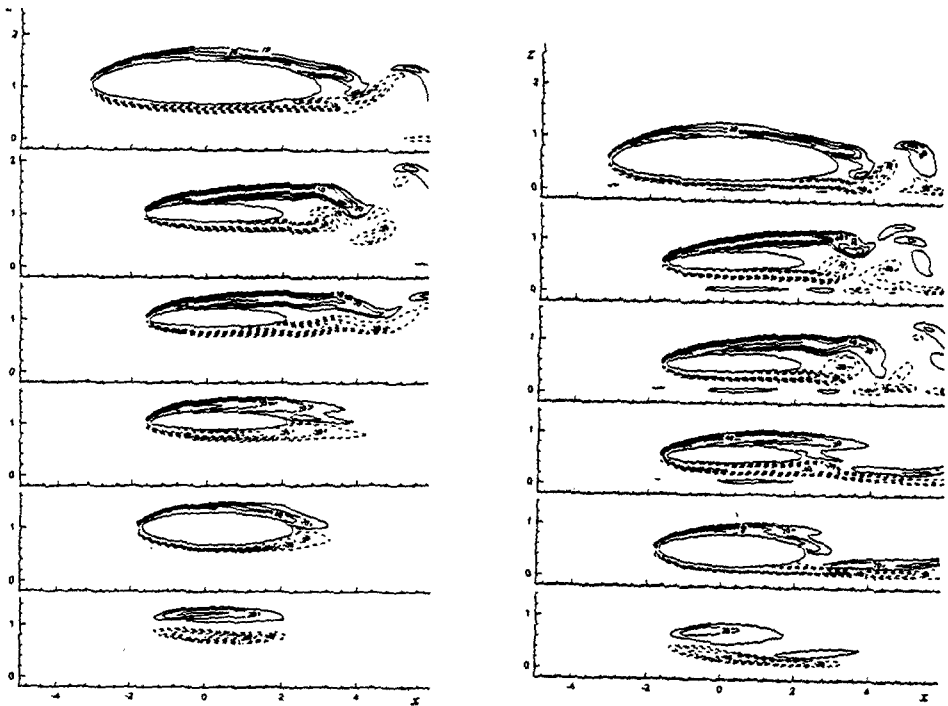
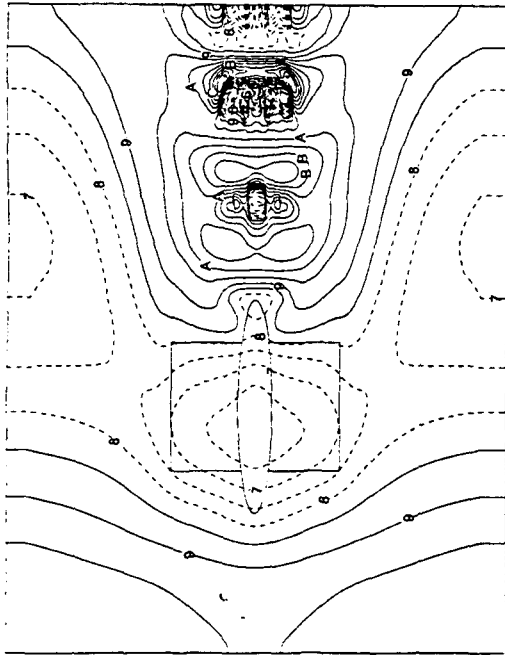
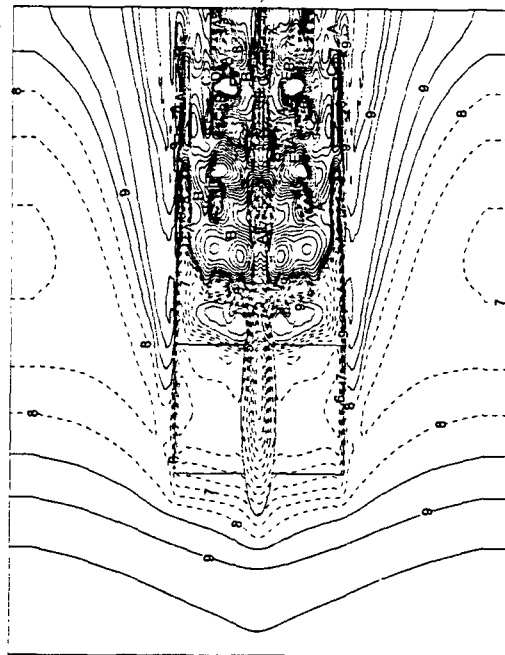


Fig.9 Vorticity (ω_y) fields and limit streamlines fields on the vertical plane A~F(from above) in Fig.6, $h/c=0.194$ and $h/c=0.056$ from left.



Level	WVHT
F	2.6E-4
E	2.2E-4
D	1.8E-4
C	1.4E-4
B	1.0E-4
A	6.0E-5
9	2.0E-5
8	-2.0E-5
7	-6.0E-5
6	-1.0E-4
5	-1.4E-4
4	-1.8E-4
3	-2.2E-4
2	-2.6E-4
1	-3.0E-4



Level	WVHT
F	2.6E-4
E	2.2E-4
D	1.8E-4
C	1.4E-4
B	1.0E-4
A	6.0E-5
9	2.0E-5
8	-2.0E-5
7	-6.0E-5
6	-1.0E-4
5	-1.4E-4
4	-1.8E-4
3	-2.2E-4
2	-2.6E-4
1	-3.0E-4

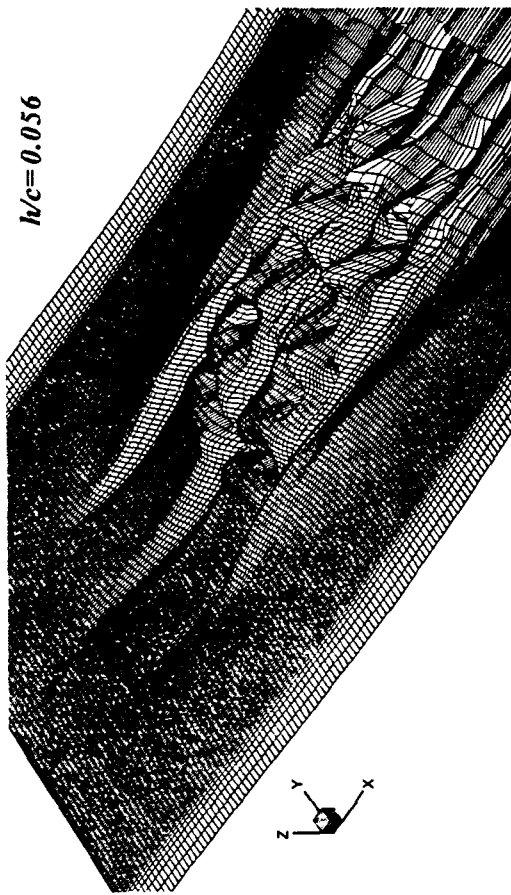
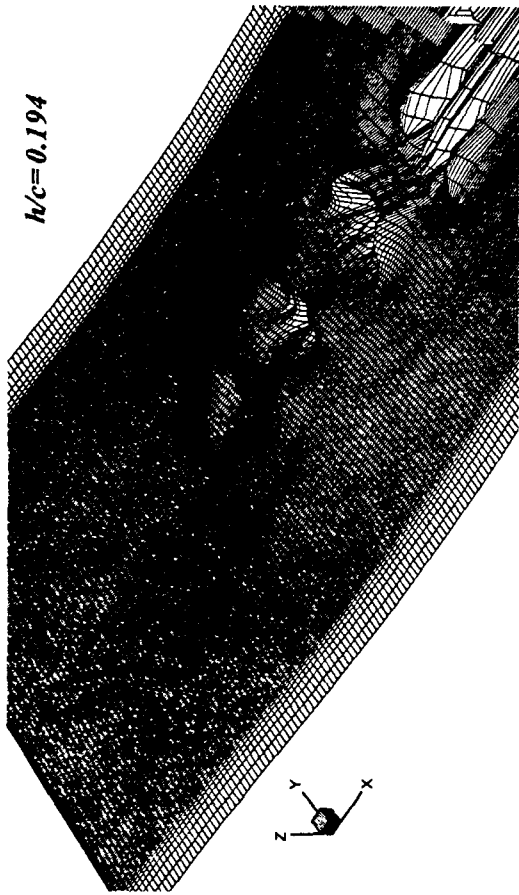


Fig.10 Wave contour maps around a numerical WIG ship model, $h/c=0.194$ and $h/c=0.056$ from above.

Fig.11 Perspective views of wave configuration of a numerical WIG ship model.