

# 수치시뮬레이션에 의한 공기부양선 주위의 유동장해석과 조파저항계산

## A Numerical Analysis on Flow Fields and Calculation of Pressure Resistance about an Air Supported Ship

나 영인<sup>\*)</sup>, 이 영길<sup>\*)</sup>  
 Y. I. Na and Y. G. Lee

A numerical computation is carried out to analyse characteristics of flow fields around Air Supported Ships having arbitrary form. The computations are performed in a rectangular grid system with MAC(Marker And Cell) method. The governing equations are represented in a Finite Difference form by forward differencing in time and centered differencing in space except for convection terms. For validation of this numerical analysis method, the computation of flow fields around Catamaran and ACV(Air Cushion Vehicle) with pressure distribution on free surface are done, and that around Surface Effect Ship is also carried out. The results of the computations are compared with the those of existed numerical computation and experimental results with the same condition.

### 1. 서 론

본 연구에서는 일정속도로 항주하는 고속 쌍동선, ACV(Air Cushion Vehicle), 표면효과선 주위의 유동장을 유한차분법(Finite Difference Method)에 의하여 시뮬레이션 하였다. 지배방정식으로는 3차원 운동량방정식인 Euler equations와 연속방정식(continuity equation)을 사용하였다. 수치계산은 MAC(Marker And Cell)법을 기초로 한 직사각형격자계에서 수행되었다. MAC법은 비선형성이 강한 자유수면에 관한 문제에 있어서 효과적인 해석방법의 하나임이 여러 논문들에 의하여 입증된 바 있으며[1,2], 직사각형격자계는 물체적합좌표계와 비교하여 계산의 정도는 다소 떨어지나, 고속선형과 같이 기하학적으로 복잡한 3차원 임의형상주위의 격자구성에 있어서 적용성이 우수하다. 또한, 계산의 정도를 높이기 위하여 교차격자계(staggered mesh system)와 가변격자계(varialbe mesh system)를 사용하였다. 계산영역은 한쪽 단동체만을 포함하는 유동장으로 구성하였으며, 고속선의 중앙면에 대칭조건을 부가하여 유동장의 대칭성을 고려하였다.

개발된 수치해석법의 검증을 위하여 수식선형인 Wigley선형으로 이루어진 고속 쌍동선주위의 유동장 및 조파저항 계산을 수행하였고, 또한 자유수면에 일정한 압력을 부가한 ACV, 고속 쌍동선형에 압력분포를 함께 넣은 표면효과선에 대하여 계산을 수행하였다. 그 결과를 동일조건의 기존 수치계산과 실험 결과 및 해석적방법에 의한 계산결과와 비교, 검토하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 지배방정식

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

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

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

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

여기서, (x, y, z) : 직교좌표계  
 (u, v, w) : x, y, z 각 방향의 속도성분  
 ρ : 밀도  
 g : 중력가속도(-9.8 m/s<sup>2</sup>)  
 ϕ : p/ρ  
 p : 압력

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

## 2.2 수치계산방법

좌표계로는, 자유수면과 압력분포의 중앙이 만나는 점을 원점으로 하는 직교좌표계를 사용하였으며, x, y, z 방향은 각각 유입속도 방향, 선체의 폭 방향 및 수직방향이다. 격자계로는 직사각형격자계를 사용하였으며, ACV의 계산에 있어서는 x, y방향에 등간격격자를, 쌍둥선과 표면효과선의 계산에 있어서는 3차원의 모든 방향에 가변격자를 사용하였다. 대류항을 제외한 나머지 항들을 시간에 대하여 전진차분, 공간에 대하여 2차 중심차분으로 정리하면, 임의 시간단계에서의 각 속도성분을 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\begin{aligned} u_{i+1,j,k}^{n+1} &= \xi_{i+1,j,k} - \frac{(\phi_{i-1,j,k} - \phi_{i,j,k})}{DX_i} DT \\ v_{i,j+1,k}^{n+1} &= \eta_{i,j+1,k} - \frac{(\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k})}{DY_j} DT \\ w_{i,j,k+1}^{n+1} &= \zeta_{i,j,k+1} - \frac{(\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k})}{DZ_k} DT \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \xi_{i+1,j,k} &= u_{i,j,k} - DT \cdot UC_{i+1,j,k} \\ \eta_{i,j+1,k} &= v_{i,j,k} - DT \cdot VC_{i,j+1,k} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\zeta_{i,j,k+1} = w_{i,j,k} - DT \cdot WC_{i,j,k+1} + DT \cdot g$$

i, j, k : 격자의 위치.  
 DT : 각 시간단계마다의 시간증분.  
 DX<sub>i</sub>, DY<sub>j</sub>, DZ<sub>k</sub> : 압력점들 사이의 거리.  
 UC, VC, WC : 대류항들(convection terms).  
 (n+1) : (n+1)번째 시간단계를 표시하고, 윗첨자가 없는 변수들은 n번째 시간단계를 표시.

식 (3)과 연속방정식(2)을 이용하여 압력에 대한 Poisson 방정식을 유도하고, 유도된 방정식을 SOR법(Successive Over Relaxation method)을 이용하여 물체경계격자를 제외한 모든 영역에서 반복적으로 계산한다. 다음시간 단계에서의 속도성분들은 이와같이 하여 결정된 압력장과 운동량방정식으로부터 계산되어진다. 물체경계격자에서는 영 발산(zero divergence)조건을 만족하기 위하여 속도와 압력을 동시반복법으로 계산한다.

대류항에 차분기법은 고속 쌍둥선과 표면효과선의 계산에 있어서는 2차중심차분과 donor cell법을 조합한 hybrid scheme을 적용하였으며, ACV의 계산에 있어서는 hybrid scheme과 3차 상류차분법이 사용되었다. 사용된 hybrid scheme과 3차 상류차분식을 정리하면 다음과 같다.

- Hybrid scheme -

$$\frac{(u^2)_{i+1,j,k} - (u^2)_{i,j,k}}{DX} = \frac{1}{4} DX \left[ \left\{ (u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{3}{2},j,k})^2 - (u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j,k})^2 \right\} + \alpha \left\{ (u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{3}{2},j,k})(u_{i-\frac{1}{2},j,k} - u_{i+\frac{3}{2},j,k}) - (u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j,k})(u_{i-\frac{1}{2},j,k} - u_{i+\frac{1}{2},j,k}) \right\} \right]$$

단,  $\alpha$  : Combination Factor (0.25 or 0.8)

- Third-order upwind scheme -

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i+\frac{1}{2},j,k} = u_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{-u_{i+\frac{5}{2},j,k} + 8(u_{i+\frac{3}{2},j,k} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}) + u_{i-\frac{3}{2},j,k}}{12DX} + \alpha_4 \left| u_{i-\frac{1}{2},j,k} \right| \frac{u_{i+\frac{5}{2},j,k} - 4u_{i-\frac{3}{2},j,k} + 6u_{i+\frac{1}{2},j,k} - 4u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i-\frac{3}{2},j,k}}{24DX}$$

$\alpha_4 = 2$  (for Agarwal scheme),  $6$  (for Kawamura scheme)

### 2.3 경계조건

#### 2.3.1 물체 경계격자 설정

선체의 표현에 있어서는, XY평면은 선분들의 연속으로 표현된 수선들(water lines)로 YZ평면은 하나의 격자에서 수직방향의 변화가 무시된 횡절선들(station lines)로 표현된다. 모든 격자들은 유체격자(fluid cell), 물체 경계격자(body boundary cell), 빈 격자(empty cell)로 분류되며, 각각의 격자에 알맞도록 계산법이 구성되어 있다.

#### 2.3.2 물체경계조건

물체경계에서는 free-slip condition을 적용하였으므로, 물체 경계격자(B-cell)에서 다음 3조건을 만족하도록 하였다.

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

그리고, 물체 경계격자에서의 압력 반복계산식은 유체격자에 대한 식 대신에 다음 식(5)를 사용함으로써 물체 경계격자에서 주위 압력들의 유무에 관계없이 압력 계산을 가능하게 한다.

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

여기서  $V_p$ 와  $n$ 은 물체 경계격자에 속한 선분의 중심에서 유체의 속도벡터와 단위법선벡터이며,

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

Table 1 Principle dimension of Wigley Hulls

대상선명	Wigley	Wigley Transon
수선간장(Lpp)	1.0 m	1.0 m
선폭(Breadth)	0.1 m	0.2 m
흘수(draft)	0.0624 m	0.1248 m
s/L	0.5	0.5

s : separation distance between centerlines of catamaran hulls  
L : ship length on still waterline

Table 2 Computational condition

대상선명	고속 항동선 & 표면효과선		ACV	
	Wigley	Wigley Transon		
Froude 수	1.0			
격자의 개수	X 방향	155	123	
	Y 방향	58	38	
	Z 방향	24	30	
	총격자수	215760	257040	145920
완화계수	0.8		1.5	
시간중분	(무차원)	0.0018	0.0018	0.005
	시간:	0.9	2.7	1.0
총계산시간	L 기준)	10.0	5.0	10.0

이다. 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 무시하면, 자유표면의 위치를  $z=\zeta$ 라 할 때, 이 위치에서 동력학적 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,  $\Phi_0 = \frac{P_0}{\rho}$ ,  $P_0 = \text{대기압}$

식(7)의 경계조건과 "irregular star"[3]를 사용하면, 자유표면 근처에서 압력은 3차원인 경우 다음의 식(9)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} \Phi_{i,j,k} = & \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 + \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 + \eta_1 \eta_2 \eta_5 \eta_6} \\ & \times \left\{ \frac{\eta_2 \Phi_1 + \eta_1 \Phi_2}{\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2)} + \frac{\eta_4 \Phi_3 + \eta_3 \Phi_4}{\eta_3 \eta_4 (\eta_3 + \eta_4)} \right. \\ & \left. + \frac{\eta_6 \Phi_5 + \eta_5 \Phi_6}{\eta_5 \eta_6 (\eta_5 + \eta_6)} - \frac{1}{2} R_{i,j,k} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

여기서,  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$ 는 자유표면과 압력점 사이의 거리이다. 식(8)에 의해 표현된 운동학적 조건도 자유표면에 놓여진 marker입자들을 사용하여 만족되어진다. Marker입자들은 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, 유출경계면과 측면경계면에서는 속도, 압력 모두 Neumann조건을, 저면경계면은 압력에 정수압을, 속도에 Neumann조건을 주었다.

## 3. 계산결과 및 고찰

### 3.1 고속 쌍동선형의 계산

수식선형인 Wigley선형에 대하여,  $Fn=1.0$ 에서 개발된 계산조직을 이용하여 계산이 수행되었다. 단동체의 주요요목과 계산조건은 Table 1. 2에 나타내었다. Figure. 1은 계산에 사

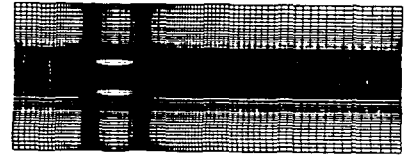


Fig. 1 Grid system for Catamaran (Wigley)

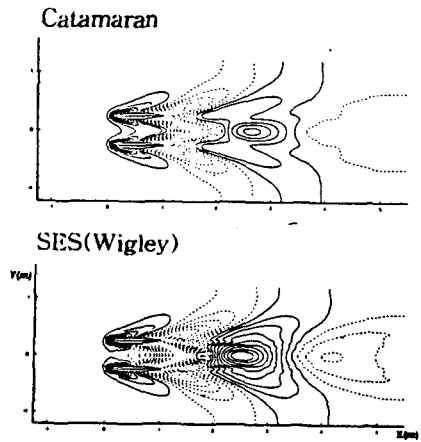


Fig. 2 Comparison of the wave contours of Catamaran & SES(Wigley)

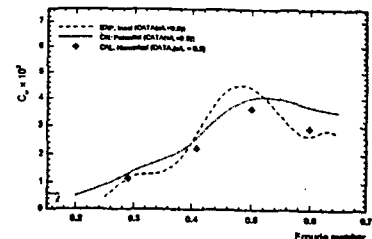


Fig. 3 Pressure resistance coefficients( $C_p$ ) of Catamaran(Wigley)

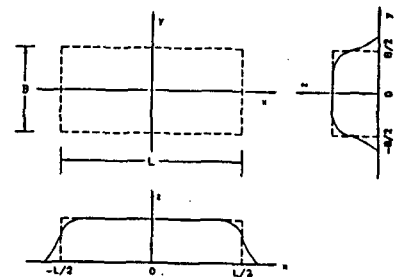


Fig. 4 Pressure distribution for ACV

용된 격자계를 보이고 있다. 계산결과들은 참고문헌 [4]에서 잘 비교, 검증된 바 있다. Figure. 2는 무차원시간 10에서의 등파고선을 나타내고 있다. Figure. 3은 본 계산의 선체표면 압력들을 적분한 압력저항계수(Cp)의 계산결과가 동일조건 실험에 의한 조파저항계수와 근사함을 보이고 있으며[4, 5],  $Fn=1.0$ 에서의 압력저항계수는  $Cp = 0.164 \times 10^{-2}$ 으로, 위의 결과로 볼 때 실험으로부터 구한 조파저항계수에 근접할 것으로 추정할 수 있다.

### 3.2 ACV의 계산

ACV에 대한 계산조건들을 Table 2에 보이고 있다. 고속 쌍동선형과 마찬가지로  $Fn=1.0$ 에서 계산이 수행되었다. 계산 영역은 XY 평면에 있어서는 기존의 Kohara[6] 수치계산과 동일하며, 격자계로는 X, Y방향은 등간격 격자를, Z방향은 가변격자를 사용하였다. Figure. 4는 ACV의 계산을 위하여 자유수면에 부가한 압력분포이다. ACV의 skirt에 해당하는 부분에서의 압력분포는 그림에서와 같이 sine 함수로 감소시켜 분포하였다. 자유수면에 부가한 압력분포는 Kohara의 계산과 동일하다.

본 계산의 대류항 차분법에 있어서, hybrid scheme인 경우에는 doner-cell법에 의한 차분화 비율을 달리하여(25%, 80%), 3차 상류차분법은 인공산일항(artificial dissipation term)의 크기를 달리하여( $\alpha_1=2$ (Agarwal법에 해당), 6(Kawamura법에 해당)) 진행하였다. Figure. 5는 무차원시간 10에서의 종방향 중앙대칭면에서의 파형들이다. 그림에서 알 수 있듯이 standing method를 사용한 해석적결과[6]와는 많은 차이를 보이지만, Kohara에 의한 수치계산 결과와는 ACV에서 멀리 떨어진 위치를 제외한 선체근처에서는 좋은 일치를 보인다. Figure. 6에서는 ACV의 조파저항값을 비교하고 있다. Kohara의 수치계산결과와 비교하여 15%정도 작은 값을 가지나, 거의 비슷한 수렴상태를 보이고 있다.

### 3.3 표면효과선의 계산

표면효과선에 있어서는, Wigley선형과 기존 Wigley선형의 선체 전방부만을 취한 Wigley Transom선형에 대하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 표면효과선의 선체주요요목과 계산조건은 각각 Table 1과 2에 실려 있다.

(1) Wigley선형: 배의 크기와 계산영역은 고속 쌍동선의 계산과 동일하다. 자유수면에 길이방향으로는 ACV와 동일한 압력을 분포시켰으며, 폭 방향으로도 동일한 압력을 균일하게 부가하였다. Figure. 2에서는 무차원시간 10에서의 등파고선을 고속 쌍동선의 계산과 비교하고 있다. 그림에서 선측의 파형은 서로 유사함을 보이나, 표면효과선에 있어서 쿠션룸(Cushion room)내의 압력분포로 인하여 압력부가부와 선체 하류에서의 파형은 완전히 다른 경향을 보이고 있다.

(2) Wigley Transom선형 : 자유수면에서의 압력분포는 Wigley선형의 계산과 동일하다. Figure. 7은 무차원시간 5.0까지의 선체와 압력분포로 인한 압력저항계수를 도시하고 있

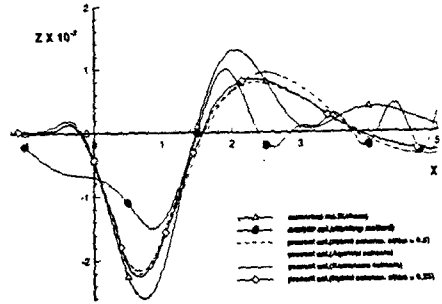


Fig. 5 Free surface profiles along the longitudinal center line of ACV

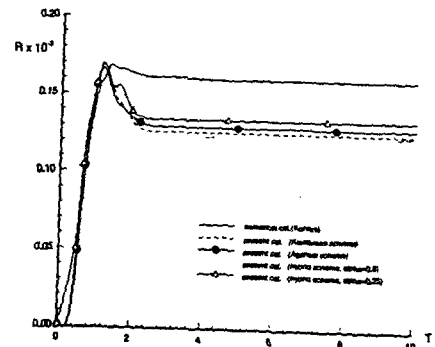


Fig. 6 Time history of wave resistance for ACV

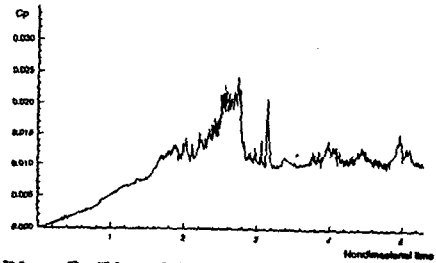


Fig. 7 Time history of pressure resistance coefficient(Cp) for SES(Wigley Transom)

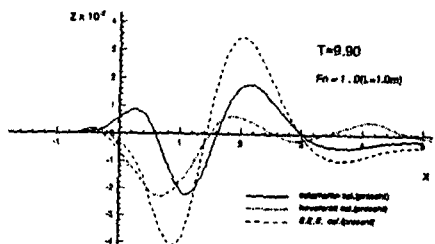


Fig. 8 Free surface profiles along the longitudinal center line of ACV

다. 시간에 따라 압력저항계수의 변화가 다소 크기는 하지만 가속이 끝난 후로는 일정범위내에 있는 것을 볼 수 있다.

무차원시간 10.0에서의 고속 쌍동선, ACV 및 표면효과선의 종방향 중앙대칭면에서의 파형을 Fig. 8에서 비교하고 있다. 쿠션룸내의 압력분포로, 표면효과선에 있어서 동일 조건의 고속 쌍동선과 비교하여 전반적으로 높은 파도가 생성되고 있으나, 항주자세가 고려되지 않았기 때문에 실제 표면효과선이 보이는 파형과는 차이가 있을 것이다.

Figure. 9는 고속 쌍동선, ACV 및 표면효과선 주위의 파형의 조감도로서, 각 그림에서의 파고들은 계산된 결과를 좀 더 가시화하기 위하여 8배로 증폭되었다. 그림에서 Wigley선형의 표면효과선 계산결과가 동일조건의 고속 쌍동선에 비하여 선체 하류에서의 파형이 조금 더 안정되어 있음을 볼 수 있다. Wigley transom선형의 표면효과선의 경우, 위의 계산들과 비교하여 선미부에서 보다 복잡한 유동특성을 보임에도 불구하고 계산이 가능함을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

(1) 비선형성이 강하고 자유수면을 포함한 공기부양선의 유동장계산이 MAC법을 적용하여 효과적이었다.

(2) transom 선미를 가지는 표면효과선과 같은 기하학적 으로 복잡한 고속선형주위의 유동장 계산에, 직사각형격자 계가 적용성이 우수함을 확인하였다.

(3) 개발된 수치계산조직은, 항주자세를 고려한 선체주위의 유동장계산이 가능하게 된다면, 고속선의 초기 선형 설계 단계에서 충분히 활용이 가능할 것이다.

#### 참고문헌

[1] Nishimura S., Miyata H.,(1985) " Finite Difference Simulation of Ship Waves by The TUMMAC-IV Method and its Application to Hull-Form Design ", J. soc. Nav. Archit. Jpn., Vol.157.

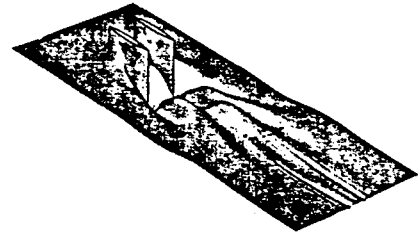
[2] Lee Y.-G., Miyata H. and Kajitani H.,(1988) " Some Application of the TUMMAC Method to 3D Water-Wave Problem ", J. Soc. Naval Archit. Korea, Vol.25, No.4, Dec.

[3] Chan, R. K. et al.,(1970) "SUMMAC - A Numerical Model for Water Waves", Dept. of Civil. Eng., Stanford Univ., Technical Report No. 135.

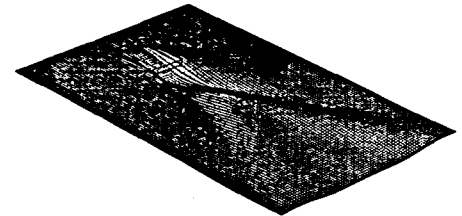
[4] 정승규, 이승희, 이영길, 홍성완,(1995)" 유한차분법을 이용한 쌍동선형 주위의 유동장해석", 대한조선학회 1995년도 춘계연구발표회 논문집, pp.53-57.

[5] Insel, M. and Molland, A. F.,(1991) "An Investigation into the Resistance of High Speed Displacement Catamarans ", Trans. RINA.

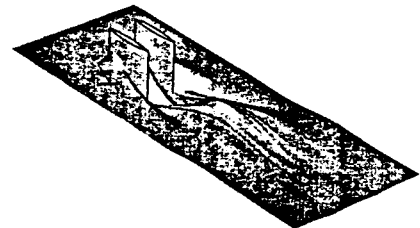
[6] Kohara S. and Nakato M.,(1992) "Numerical Computation on Surface Waves Generated by a Running Pressure Disturbance ", J. Soc. Naval Archit. Japan, Vol.171, pp.41-52.



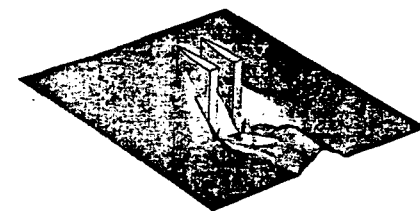
Catamaran



ACV



SES(Wigley)



SES(Wigley Transom)

**Fig. 9 Wave perspective views of the cases of Catamaran(Wigley), ACV, SES(Wigley) and SES(Wigley Transom)**