

滑走平板의 造波現象에 關한 數值研究

郭 承 鉉*
(95년 12월 20일 접수)

Numerical Study on Wavemaking Phenomena Generated by a Planing Flat Plate

Seung-hyun Kwag*

Key Words : Planing Flat Plate(활주평판), Free-Surface(자유표면), Finite Difference Method(유한차분법), Viscous Flow(점성유동), Wavemaking Phenomena(조파현상), Characteristic Wave Pattern(특성파형)

Abstract

Numerical study is carried out to make clear the wavemaking phenomena for a planing flat plate. Through the numerical computations, some schematic wave patterns are compared with experimental results, for example, such as the bow divergent waves, triangle waves, stern divergent waves, stern cross waves. The characteristic distance of waves is found to be more inconsistent as the incidence angle increases. The comparison was made between computations and experiments for incidence angles of 5, 10 and 15 degrees. However, a numerical difficulty is found around and behind the trailing edges for more than 20 degree.

1. 서론

활주평판의 유체역학적 연구는 최초로 Wagner¹⁾에 의해서 중력의 영향이 없는 무한대의 프루드(Froude)수에서 진행방향으로 무한히 긴 2차원 활주평판에 관한 것이었다. 이어 Green²⁾은 등각사상(等角寫像)을 이용하여 길이가 유한한 경우에 대하여 해를 구했으나 이것들은 불연속의 이론을 응용했기 때문에 평판의 앞날(leading edge)에서

발생하는 비말(飛沫, spray) 부근의 해법에는 적합하지만 중력의 영향을 완전히 무시하고 있기 때문에 유한 프루드수에서 유체역학적 현상을 파악하는 것이 불가능했다. Green에 의하면 활주평판과 그에 접하여 발생하는 비말은 정수면에서 진행방향으로 나타나고 있는 비말현상과는 현실적으로 맞지않고 있다. 중력의 영향을 고려한 유한 프루드수에 있어서 활주평판을 취급한다면 비말저항 뿐만 아니라 조파저항도 다룰 수 있다. 이런 개념에서

* 漢拏工業專門大學 造船科

조파저항을 최초로 적용했던 것은 Sretenski, Sedov³⁾에서 볼 수 있으며, 수면에 압력을 가하여 조파이론을 다루었으나 이 이론으로는 비말저항과 조파저항의 관계에 대하여는 해결하지 못했다. 비말의 생성은 비선형의 현상으로 Maruo⁴⁾는 평판에 압력을 분포하고 특이점을 분포시켜 비말저항과 조파저항을 각각 선형이론으로 표현하였다. 또한 Cumberbatch⁵⁾와 Squire⁶⁾도 같은 종류의 계산을 수행하였다. 한편, 활주면의 폭이 유한인 경우 유체의 운동은 3차원이 된다. Maruo는 2차원 물체를 3차원으로 확장하였으나 기본가정으로, 유체에는 점성이 없고, 유체의 속도는 전진속도에 비하여 극히 작은 것으로 간주하여 제곱항은 무시하고, 유한 폭의 활주면에 관한 이론에서는 활주면의 길이가 폭에 비해 매우 작고, 순수한 활주상태가 존재한다고 가정하여 3차원 활주평판의 조파저항 이론을 취급하였다^{7),8)}.

또한 Tulin⁹⁾은 Wagner의 스트립(strip)방법을 확장하여 고속에서 세장물체 이론을 도입하여 3차원 문제를 전개했다. 그 외에 Ogilvie¹⁰⁾는 matching 방법으로, Doctors¹¹⁾는 조파이론의 선형 해를 적분방정식을 이용하여 3차원 활주평판 문제로 전개하였다. 그러나 상기에서 서술한 2차원 또는 3차원 활주평판의 이론은 거의 모두가 활주평판의 입사각(incident angle)이 미소해서 5° 정도 이었다. 그 이상의 입사각에서는 이론과 실험이 일치하지 않았고 또한 이들 이론의 대부분은 활주정의 저항 경감을 위한 설계목적으로, 활주평판 부근의 유동장을 엄밀히 취급하고 있으나 활주평판이 만드는 파, 특히 선미로부터의 조파현상과 발생하는 파 자체의 연구는 거의 없다.

종래의 활주평판 이론의 거의 대부분이 해석적 방법에 근거하고 있으나, 최근에 컴퓨터의 급격한 진보에 동반하여 고속 및 대용량의 계산이 가능해져 Navier-Stokes 방정식을 직접 수치 계산하는 수치유체역학의 연구가 활발해졌고, 해양토목공학 및 선박공학 분야에도 수치적 해법이 발전되고 있는 실정이다. 그러나 지금까지 자유표면파를 다루는 유체문제의 계산은 거의가 포텐셜 유동으로 점성을 고려한 계산은 별로 많지 않았다. 자유표면 문제를 차분법에 의한 수치계산으로 해를 구할 경

우 파의 발달 과정에서 안정성 있는 해를 얻으려면 장시간의 계산이 필요하다. 이것은 계산효율과 매우 밀접한 관계를 가지며, 해의 수렴을 가속시킬수 있는 새로운 계산방법을 개발하는 것이 강력히 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 이상과 같은 것을 배경으로 활주평판의 조파현상을 규명하는 기초적 연구로서 유한폭 활주평판을 다루었다. 평판의 입사각은 5° , 10° , 15° 로 비말을 포함하지 않는 후속파를 대상으로 하였다. 본 계산에서 수행한 MAC(marker and cell)법에 기초를 둔 방법으로 얻어진 해는 대단히 안정성이 있으나 계산시간이 상당히 소요되어 상대적 효율이 좋지 않다. 종래의 조파문제에 관한 차분계산은 주로 본 방법에 기초를 한 유한차분법으로 점성유동장 계산에서 주로 많이 사용되어 왔다.

본 계산은 선체주위의 자유표면 점성유동장을 Navier-Stokes 방정식을 이용해 유한차분법(finite difference method)으로 수치계산한 계산 프로그램을 활주형 평판에 적용한 것이다. 점성유동을 포함해 자유표면 계산을 위해서 가장 많이 사용되는 방법은 MAC법에 기반을 둔 것으로 오랫동안 사용되어져 왔지만 아직 부적합한(improper) 부분이 상당히 있다. 예를 들면 자유표면을 구하는 경우 격자 크기는 프루드수에 의존해야 함에도 불구하고 아직 레이놀드(Reynold)수에 영향을 받고 있고 또 하나의 단점은 자유표면파가 불충분한 격자 수에서는 파도 생성이 어렵다는 것이다¹²⁾.

자유표면파는 무한유체(unbounded flows)와는 달리 파 전달(wave propagation)을 통해 방사(radiation)가 이루어지기 때문에 무한 경계(open boundary)에서의 제로 외삽법(zero extrapolation)은 격자 간격이 아주 작지 않은 경우에는 파도의 생성을 어렵게 만든다. 이러한 문제들은 수치유체역학 연구자들의 주요 연구 대상이 되어 왔고 이런 자유표면 문제의 연구진척이 늦은 것은 대부분의 수치 계산방법이 자유표면을 다루지 않는 항공이나 기계 분야에서 응용되어 왔기 때문이다. 자유표면을 좀더 효율적이고 정확히 다룬 연구는 주로 Fujita¹³⁾, Mori¹⁴⁾, Lungu¹⁵⁾ 등에 의해 이루어졌다.

자유표면 유동은 크게 두가지 유체역학 계수에 영향을 받는데 하나는 레이놀드수이고 다른 하나는 프루드수 즉, Wave 수 또는 Wave 길이이다. Hinatsu¹⁶⁾는 자유표면 경계조건에서 tangential 조건은 점성유동 조건에서 매우 작은 영향을 미치기 때문에 선체 유동의 계산에서는 무시하고 있고 따라서 레이놀드수를 선체 주위에서 흐름 조건의 주요한 계수로 취급한다. 그러나 자유표면 근처의 유동해석에서는 프루드수가 큰 영향을 미치기 때문에, 결국 자유표면 물체주위의 격자는 레이놀드수에 영향을 받게 되고 자유표면에는 프루드수가 영향을 미치는 상반되는 수치적 문제를 안고 있다. 본 연구는 MAC법의 근간을 이루는 양해법(explicit method)에 의한 계산¹⁷⁾을 수행하고 입사각(incidence angle)이 자유표면 형성에 미치는 영향 등을 검토했다.

2. 수치해법

2.1 기초방정식

비압축성 및 비정상유체에 대한 점성유동장을 계산하기 위해 Navier-Stokes 방정식을 무차원화하여 다음과 표기하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u - (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v - (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{1}{Re} \nabla^2 w - (u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) \end{aligned} \quad (1)$$

(1)은 특성길이 L' , 균일유입속도 C' , 좌표(x' , y' , z'), 속도(u' , v' , w'), 압력 p' , 시간 t' 을 무차원화하여 얻은 것으로 다음의 관계에 있다.

$$\begin{aligned} u &= \frac{u'}{C'} , v = \frac{v'}{C'} , w = \frac{w'}{C'} \\ x &= \frac{x'}{L'} , y = \frac{y'}{L'} , z = \frac{z'}{L'} \\ P &= \frac{P'}{\rho' C'^2} , t = \frac{t'}{L'/C'} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 C' 은 균일유입속도, L' 은 정수중 평판의 침수길이, Re 는 레이놀드수이고, 무차원압력 Φ 는

$$\Phi = P + \frac{z}{Fn^2} \quad (3)$$

Fn 은 프루드수이다. 무차원 연속방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

(1)을 시간에 관한 전진차분법으로 표시하면

$$\begin{aligned} \frac{u^{n+1}}{\Delta t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= E \\ E &= \frac{u^n}{\Delta t} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u - (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) \\ \frac{v^{n+1}}{\Delta t} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= F \\ F &= \frac{v^n}{\Delta t} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v - (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) \\ \frac{w^{n+1}}{\Delta t} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= G \\ G &= \frac{w^n}{\Delta t} + \frac{1}{Re} \nabla^2 w - (u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $n, n+1$ 은 각각 time step을 나타낸다.

(5)를 편미분하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} &= \nabla^2 \Phi \\ &+ \frac{1}{\Delta t} (\frac{\partial u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial v^{n+1}}{\partial y} + \frac{\partial w^{n+1}}{\partial z}) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)의 마지막 항은 연속방정식을 만족하므로 zero로 놓으면 Poisson방정식은

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = R \quad (7)$$

(7)은 S.O.R. 방법으로 반복계산이 가능하고

$$\Phi^{k+1} = \Phi^k + \omega(\Phi_{cal}^{k+1} - \Phi^k) \quad (8)$$

여기서 Φ_{cal}^{k+1} 은 Φ^k 로부터 $k+1$ 번째의 새로운 계산을 가능하게 한다. ω 는 완충계수로서 0.8을 사용했고, $\Phi_{cal}^{k+1} - \Phi^k$ 의 최대치를 허용 오차범위내로 제한하였다. 압력방정식으로 부터 얻어진 Φ 값은 $(n+1)$ 시간에서의 속도계산에 사용된다.

$$\begin{aligned} u^{n+1} &= \Delta t (E - \frac{\partial \Phi}{\partial x}) \\ v^{n+1} &= \Delta t (F - \frac{\partial \Phi}{\partial y}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$w^{n+1} = \Delta t \left(G - \frac{\partial \Phi}{\partial z} - 8f_{i-1,j,k} + f_{i-2,j,k} \right) \quad (13)$$

수면상의 파고계산은 임의수면 (x,y)에서 시각 t의 수면변위를 $\eta(t,x,y)$ 라고 할때 다음을 사용할수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \omega - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (10)$$

2.2 기초방정식의 차분화

3차원 직교좌표계 (x,y,z)와 (ξ, η, ζ) 의 관계식으로부터 Laplacian 연산자는

$$\nabla^2 f = a_1 f_{\xi\xi} + a_2 f_{\eta\eta} + a_3 f_{\zeta\zeta} + a_4 f_{\xi} + a_5 f_{\eta} + a_6 f_{\zeta} + a_7 f_{\xi\eta} + a_8 f_{\eta\zeta} + a_9 f_{\xi\zeta} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} a_1 &= \xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2 \\ a_2 &= \eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2 \\ a_3 &= \zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2 \\ a_4 &= \xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} \\ a_5 &= \eta_{xx} + \eta_{yy} + \eta_{zz} \\ a_6 &= \zeta_{xx} + \zeta_{yy} + \zeta_{zz} \\ a_7 &= 2(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y + \xi_z \eta_z) \\ a_8 &= 2(\eta_x \zeta_x + \eta_y \zeta_y + \eta_z \zeta_z) \\ a_9 &= 2(\xi_x \zeta_x + \xi_y \zeta_y + \xi_z \zeta_z) \end{aligned} \quad (12)$$

3차원 자유표면 문제의 수치 불안정성은 regular 격자를 사용하는 본계산에서는 staggered 격자에 비하여 기억용량의 제한이라는 어려움과 상반되는 수치특성을 가지고 있다. 본 계산에서는 1차,2차 미분을 위해서 4차 中心差分을, 운동방정식의 대류항은 수치안정성을 얻기 위해 3차 風上(upwind)미분을 사용하였다. 예로서 임의관수 $f(x,y,z)$ 를 ξ 에 관한 1차미분을 4차 중심차분으로 나타내면

$$(f_{\xi})_{i,j,k} = \frac{1}{12\Delta\xi} (-f_{i+2,j,k} + 8f_{i+1,j,k}$$

2차 미분은

$$(f_{\xi\xi})_{i,j,k} = \frac{1}{12\Delta\xi^2} (-f_{i+2,j,k} + 16f_{i+1,j,k} - 30f_{i,j,k} + 16f_{i-1,j,k} - f_{i-2,j,k}) \quad (14)$$

여기서 $\Delta\xi$ 는 계산면의 x축 격자간격이고, f의 교차(cross) 미분을 4차 중심차분으로 나타내면

$$(f_{\xi\eta})_{i,j,k} = \frac{1}{4\Delta\xi\Delta\eta} (f_{i+1,j+1,k} - f_{i+1,j-1,k} - f_{i-1,j+1,k} + f_{i-1,j-1,k}) \quad (15)$$

운동방정식 (1)의 대류항은, 속도성분을 $q=(u, v, w)$ 로 놓으면

$$u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = Uq_{\xi} + Vq_{\eta} + Wq_{\zeta} \quad (16)$$

여기서 U,V,W는 반변속도(contravariant velocity) 성분으로

$$\begin{aligned} U &= (u\xi_x + v\xi_y + w\xi_z) \\ V &= (u\eta_x + v\eta_y + w\eta_z) \\ W &= (u\zeta_x + v\zeta_y + w\zeta_z) \end{aligned} \quad (17)$$

3차 風上차분은

$$\begin{aligned} Uq_{\xi} &= \frac{U_{i,j,k}}{12\Delta\xi} (-q_{i+2,j,k} + 8q_{i+1,j,k} - 8q_{i-1,j,k} + q_{i-2,j,k}) + a \frac{|U_{i,j,k}(\Delta\xi)^3}{4} \\ &\quad \cdot \frac{q_{i+2,j,k} - 4q_{i+1,j,k} + 6q_{i,j,k} - 4q_{i-1,j,k} + q_{i-2,j,k}}{(\Delta\xi)^4} \\ Vq_{\eta} &= \frac{V_{i,j,k}}{12\Delta\eta} (-q_{i,j+2,k} + 8q_{i,j+1,k} - 8q_{i,j-1,k} + q_{i,j-2,k}) + a \frac{|V_{i,j,k}(\Delta\eta)^3}{4} \\ &\quad \cdot \frac{q_{i,j+2,k} - 4q_{i,j+1,k} + 6q_{i,j,k} - 4q_{i,j-1,k} + q_{i,j-2,k}}{(\Delta\eta)^4} \\ Wq_{\zeta} &= \frac{W_{i,j,k}}{12\Delta\zeta} (-q_{i,j,k+2} + 8q_{i,j,k+1} - 8q_{i,j,k-1} + q_{i,j,k-2}) + a \frac{|W_{i,j,k}(\Delta\zeta)^3}{4} \\ &\quad \cdot \frac{q_{i,j,k+2} - 4q_{i,j,k+1} + 6q_{i,j,k} - 4q_{i,j,k-1} + q_{i,j,k-2}}{(\Delta\zeta)^4} \end{aligned} \quad (18)$$

2.3 계산대상 및 계산방법

유한활주평판의 조파현상을 수치재현하기 위하여 수치안정성이 있는 MAC법의 알고리즘을 사용하였다. 속도는 $T=0$ 으로부터 $T=250$ time step 까지 즉, 무차원시간 0.25까지를 가속하였다. Fig. 1은 초기조건 설정시의 $T=0$ 에서의 격자를 나타내고 있다. 좌표축은 원점($x=0$)을 정지수면상의 앞날(leading edge), x 축을 활주평판 중심선상의 진행방향으로, y 축을 폭방향 우현측, z 축을 연직상향으로 하였다. 계산격자수는 $I=167$, $J=41$, $K=19$, 영역은 $x=(-1.0, 5.0)$, $y=(0, 0.7)$, $z=(0, -0.9)$ 의 범위이고 활주평판이 만드는 파는 좌우대칭이기 때문에 우측 절반만 계산영역으로 하였다.

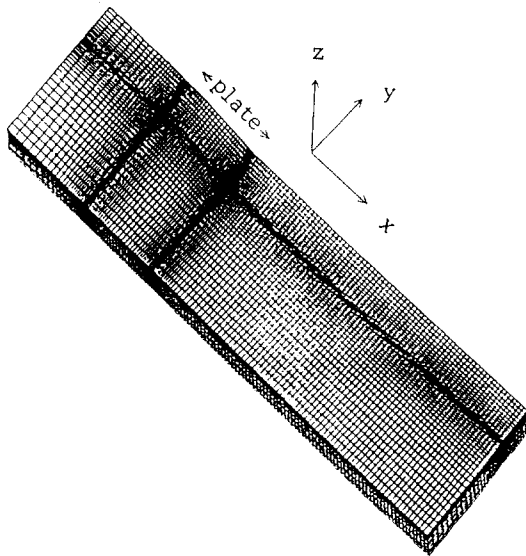


Fig. 1 Perspective grid view and coordinates definition

계산은 점성항을 고려하여 활주평판 바닥주위의 경계층이 복잡하고 수면부근의 파의 발생을 상세히 계산할 필요성이 있기 때문에 평판의 앞날(leading edge), 뒷날(trailing edge), 평판측면(side edge), 수면근처, 평판바닥 근처에는 격자를 조밀(clustering)하게 밀집시켰다. 최소격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 0.01$, $\Delta z = 0.002$ 로 하였다. 평판

이 滑走하지 않는 $T=0$ 에서는 평판근처의 정지수면은 물리적으로 $z=0$ 으로 초기조건 설정시 격자는 정지된 평판을 만들고 있으나, 평판이 경사를 갖게되면 평판으로부터 하류방향으로 긴 거리에서 다시 정지수면을 갖게 초기격자를 배치하였다.

활주평판의 크기는 정수수면위의 침수길이를 무차원길이로 할때 $B/L=0.53$ ($L=1$)으로, 평판의 입사각(incidence angle)은 $\theta=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 로 하였고 계산에는 같은 각도를 계속 유지하였다.

경계조건은 다음과 같다. 바닥(bottom)경계는 파의 영향이 적을 정도로 깊이를 유지하여 속도와 압력을 제로구배로 하였다. 유입경계는 활주평판이 상류에 영향을 미치지 않는다고 간주하여 속도는 균일유속, 압력은 정수압을 유지하며, 하류(downstream) 경계는 속도, 압력 모두 제로구배로 하였다. 활주평판 중심선위의 단면에는 좌우대칭이기 때문에 $v=0$ 을, 압력은 대칭조건으로 하였다. 활주평판의 측면에는 계산영역이 충분하다고 가정하여 속도압력 모두 제로구배로 하였다. 자유표면경계는 속도는 제로구배, 압력은 대기압으로 하였고, 평판의 물체경계는 속도는 no-slip 조건으로, 압력은 Neumann조건을 대입하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= \frac{1}{Re} \nabla^2 u = E|_{on\ body} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= \frac{1}{Re} \nabla^2 v = F|_{on\ body} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= \frac{1}{Re} \nabla^2 w = G|_{on\ body} \end{aligned} \quad (19)$$

3. 계산결과 및 고찰

本計算을 통하여 실험결과와 비교하고자 하는 것은 활주평판 후방에서 생성되는 파의 특성길이 및 형상이다. Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4는 입사각 $15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$ 에서 수행한 점성유동계산으로 $T=3.0$ 에서의 결과이고 입사류쪽을 상향으로 수면을 활주하며, 본계산에서는 $Fn=1.02$, $Rn=10^4$ 로 무차원 시간증가는 $\Delta t=0.001$ 로서 $T=0.25$ 까지 가

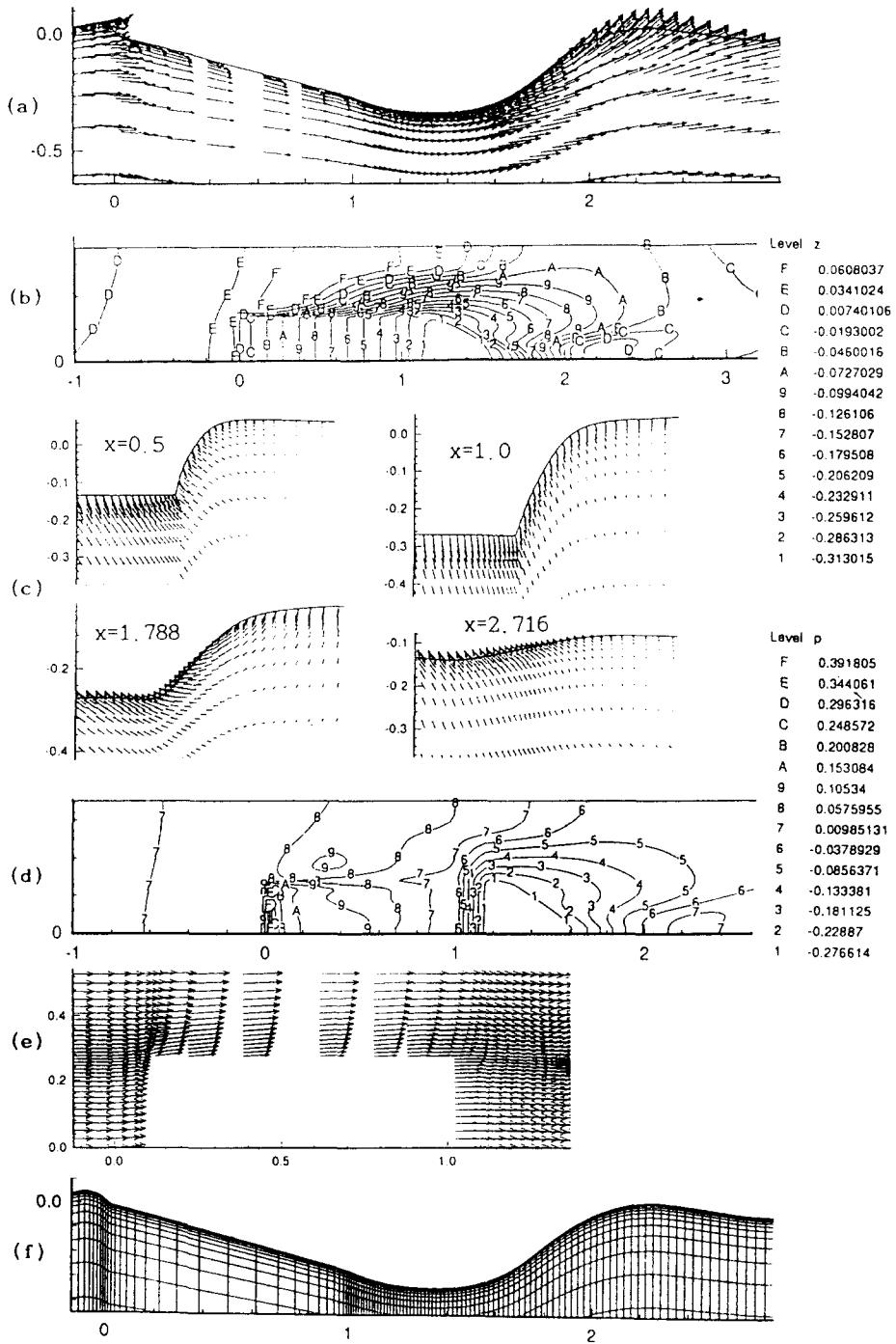


Fig. 2 Numerical simulation for flat plates at 15° incidence angle

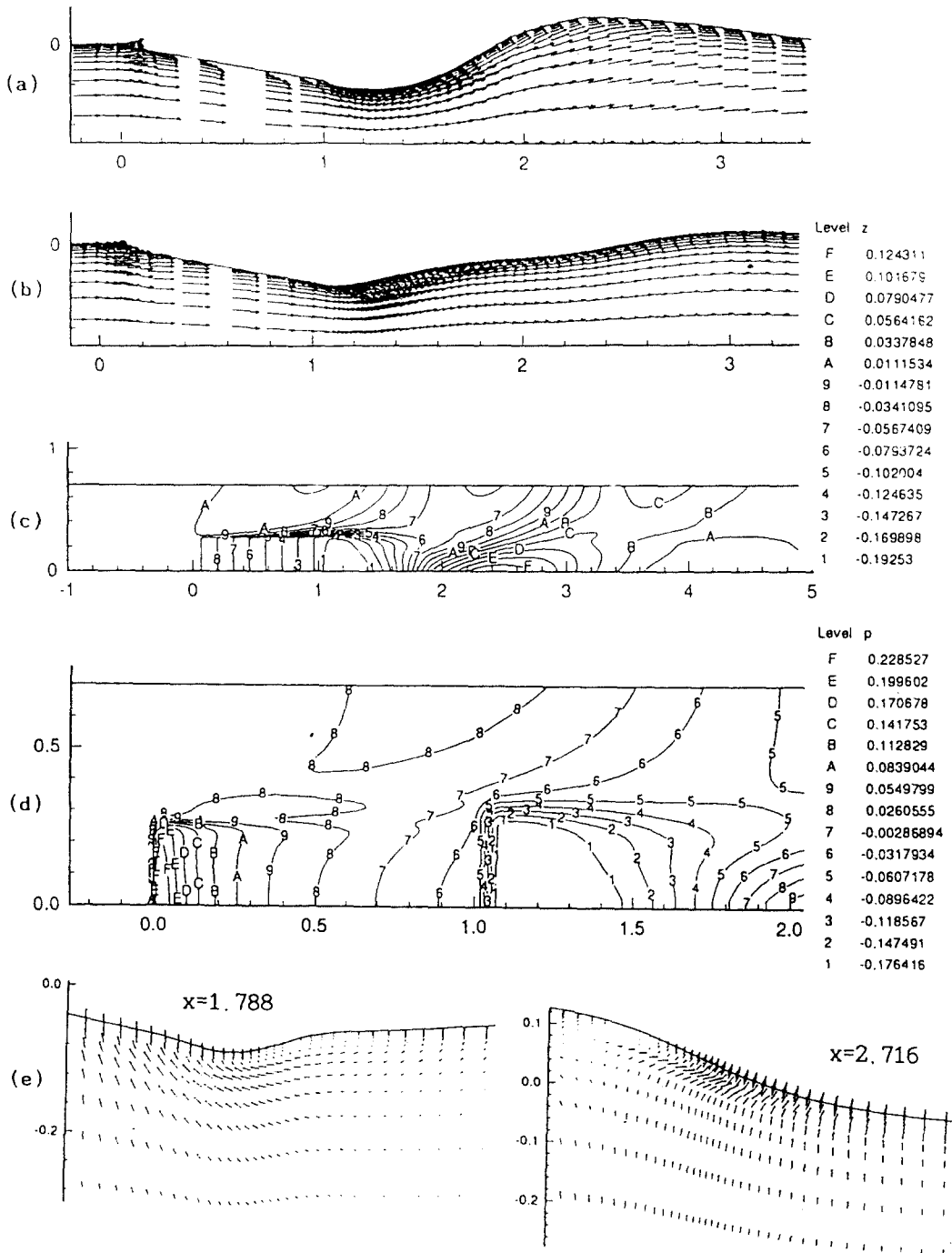


Fig. 3 Numerical simulation for flat plate at 10° incidence angle

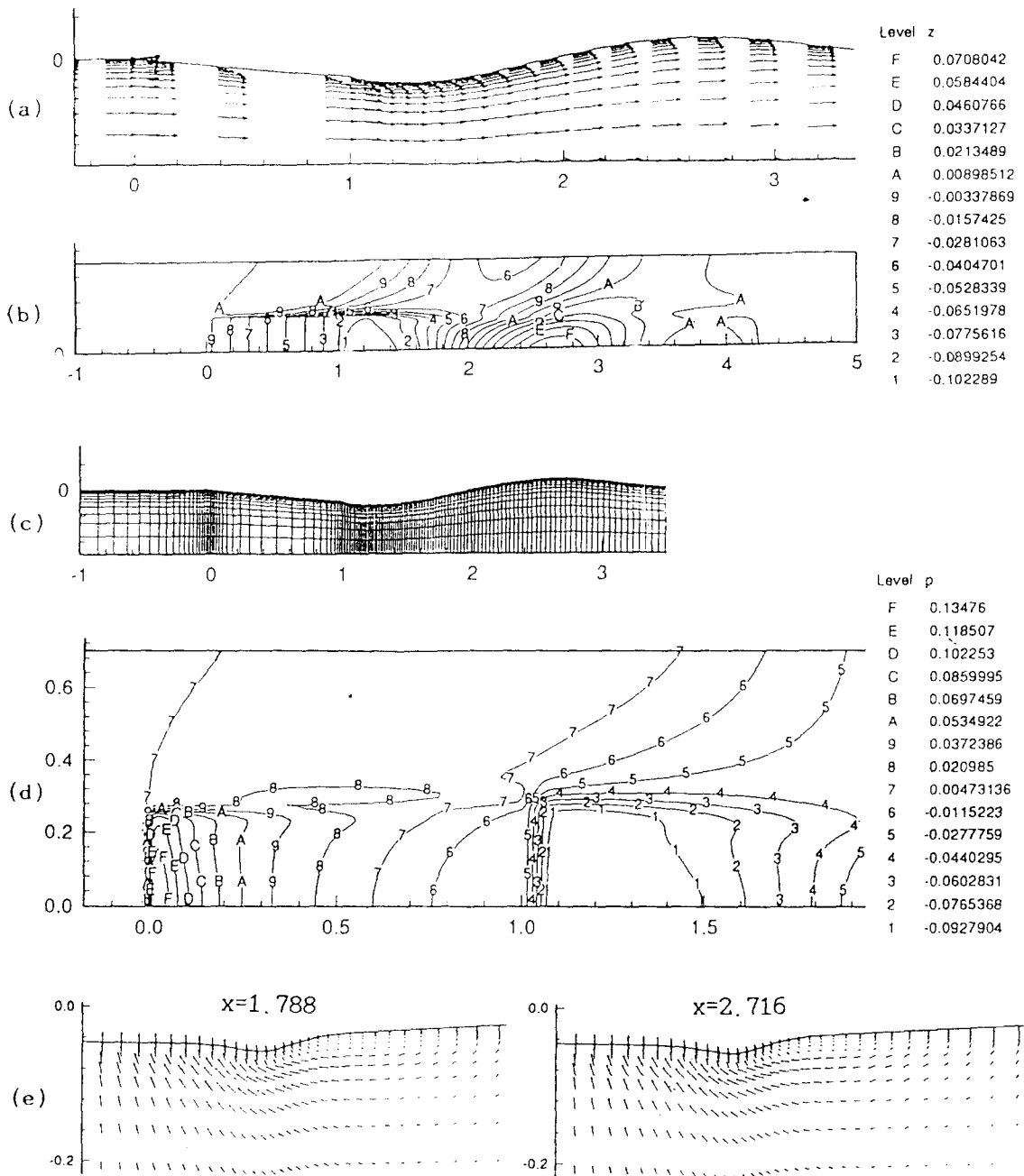


Fig. 4 Numerical simulation for flat plate at 5° incidence angle

속하였다. Fig. 5는 계산 및 실험에서 사용한 입사각, 침수깊이, 파장, 파고등을 표시한 것이다. 파형특성(schematic wave pattern)을 구체적으로 검토하기 위해 Fig. 6 과 Fig. 7의 세부적인 비교가 필요한데 a, b, 1, 8은 선수파로 인한 활주평판 주위의 점성유동 특성을 규명하고 c,2는 폭에 따르는 삼각파의 생성을 e, 7은 선미교차파를 4, 6은 선미분리파를 각각 의미한다. Fig. 8과 Fig. 9는 실험에서 얻은 결과를 인용^{18),19)}한 것이다. 계산결과에 의하면 평판측면 근처의 수면이 시간경과에 따라서 급속히 발달하여 비교적 안정성있게 정상(steady) 상태에 도달하였고 평판경사로 인하여 후방에 선미파로 확산되고 있다. 그리고 선미끝 가장자리에서 후방으로 평판중심을 향하여 교차(cross)파가 발달하여 삼각파를 형성하고 있는데 이것은 실험결과와 정성적으로 잘 일치하고 있다. 그러나 활주평판이 만드는 앞날(leading edge)주위의 비말(spray)현상은 재현하지 못하고 있다. 실험에 의하면 평판측면에 따른 중력영향으로 수면 낙하시기포가 발생되어 파면의 형상이 복잡해지고 강한非線形현상이 나타나고 있으나, 본계산에서는 격자간격이 조밀하지 못하고 무차원시간 간격이 상대적으로 크기 때문에 비말현상을 수치적으로 규명할 수 없었다. Fig. 2는 입사각 15°에서의 계산으로 (a)는 종방향 속도벡터 (b)는 자유표면 파고등고선 (c)는 종방향의 (v, w)속도벡터 (d)는 자유표면의 압력분포 (e)는 (u, v)속도벡터 (f)는 생성된 격자형상을 보여주고 있다. 15°의 비교적 큰 입사각에서는 선미후방 자유표면 경사가 상당히 커지기 때문에 자유표면의 속도벡터가 10°와 5°의 계산결과보다는 크게 나타나고, 강한 비선형현상을 보이고 있기에 수치적으로 수렴(convergency) 시키는 것은 쉽지 않았다. 생성된 자유표면 파고를 Fig. 8의 실험값과 비교하면, 15° 입사각에서 선미三角波, 八字形선미파, 선수분리파등 전체적인 경향이 실험값과 일치하고 있다. 본계산에서의 레이놀즈수가 10⁴인 층류계산임을 고려할때 평판의 압력을 적분하여 항력(drag) 및 양력(lift)을 계산하는 것은 의미가 없어 생략하였으나, 精度를 높이기 위해서는 실제 레이놀드수 및 난류모델을 삽입하여 계산을 수행해야 하고 경계층내의 급격한 속도구

배를 포착하기 위해서 평판주위에 매우 많은 격자수를 필요로 하게 된다. 전반적으로 평판측면 및 길이방향의 계산영역이 부족하여 선미파 생성에 미소한 영향을 주게 되지만 측면방향에 심한 반사파(reflection wave)가 보이지 않기 때문에 큰 영향은 없는것으로 생각된다.

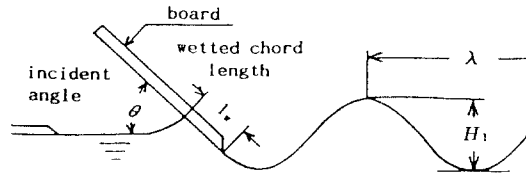


Fig. 5 Planing flat plate and measuring parameters definition

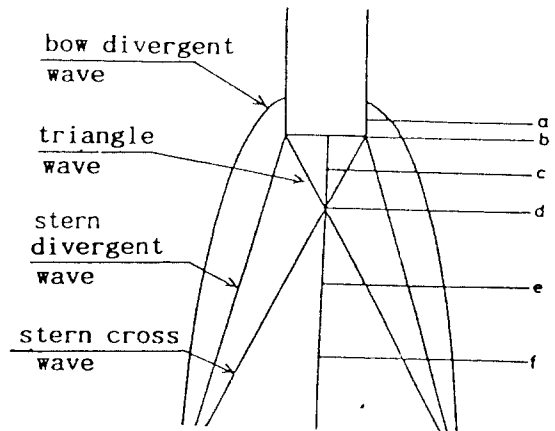


Fig. 6 Schematic wave patterns

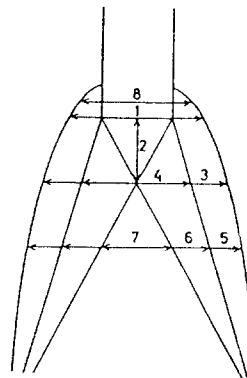


Fig. 7 Characteristic distance of waves

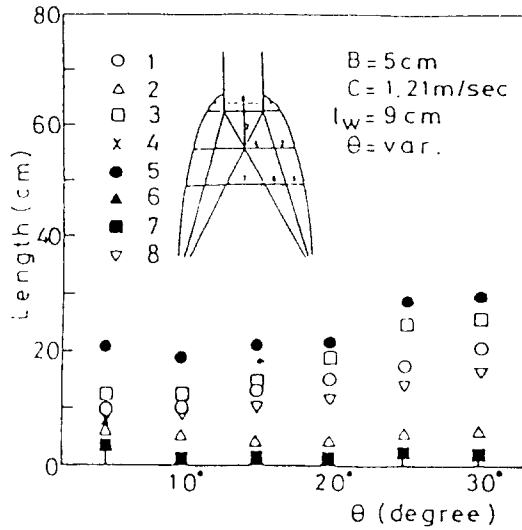


Fig. 8 Characteristic distance of waves subject to incidence angle θ ($B=5\text{cm}$, $l_w=9\text{cm}$, $C=1.21\text{m/sec}$)

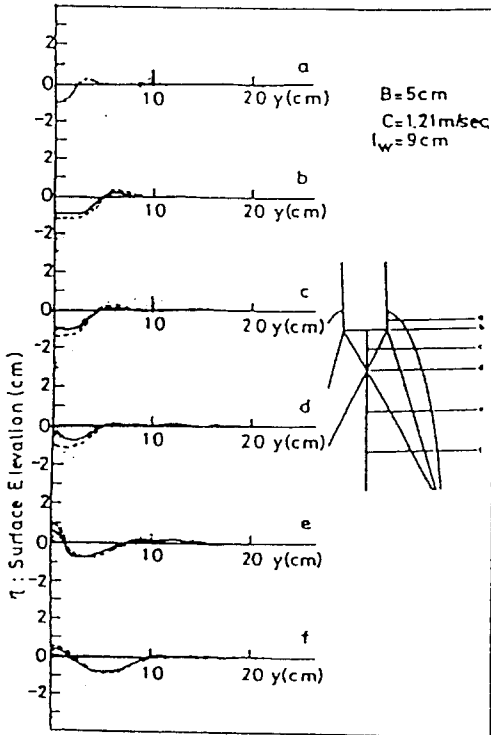


Fig. 9 Free-surface elevation at incidence angle $\theta = 10^\circ$ (Exp : ———, Cal : - - - - -)

Fig. 3은 입사각 10° 의 계산결과이다. (a)는 길이방향의 속도벡터인데 자유표면 부근의 속도분포는 레이놀드응력 및 난류유동을 잘 설명해주고 있다. (b)는 $y=0.265$ 에서의 평판측면 부근의 파고 및 속도벡터이다. (c)는 자유표면 파고분포인데 Fig. 9에서 실험값과 계산결과를 비교하였다. Fig. 8은 입사각에 따른 특성길이인데, 一例로 三角波까지의 거리 '2'를 비교하면 5° , 10° , 15° 경우 계산결과에 의하면 각각 3.87, 3.69, 3.60로 실험값과 비슷한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 4는 입사각 5° 의 계산결과이다. (a)는 길이방향 단면의 속도분포이고 (b)의 자유표면 파고 분포로 앞에서와 같이 Fig. 8을 이용하여 실험값과 비교분석이 가능하였다.

4. 결론

유한폭 활주평판의 조파계산을 위하여 점성이 포함된 Navier-Stokes 방정식의 직접수치계산을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 차분법에 의한 점성유동 수치해석은 내부유동뿐만 아니라 평판후방의 파형을 정확히 계산하여 실험값과 비교검증이 가능하였다.
- (2) 유한폭 활주평판의 경우 평판의 입사각이 변함에 따라 파형이 상당히 바뀌게 되고 또한 입사각이 15° 이상이 되면 평판측면의 강한非線形현상 때문에 수치해석의 정확도가 떨어짐을 보인다.
- (3) 3차원 特有의 선미파를 5° , 10° , 15° 의 입사각에 대해 수치해석이 가능했기에 이의 응용으로 침수길이, 평판폭, 입사각등을 변화시켜 해석결과를 쉽게 얻을 수 있고, 추후 3차원 波문제를 실험에 의존하지 않고 컴퓨터 數值計算으로 대신할 수 있을 것을 기대한다.

本 計算에서 使用한 computer는 漢學工業專門大學의 SUN Sparc 20 이고 CPU는 1개의 프루드수에서 약 60시간이 소요되었다.

參 考 文 獻

- 1) Wagner, H., "Über das Gleiten von Wasserfahrzeugen", Jahrbuchder, Schiffbautechnik, 1932
- 2) Green, N.E., "Note on the Gliding of a Plate on the Surface of a Stream", Proceedings of Cambridge Philosophy of Society, Vol.32, 1936
- 3) Sedov, L.I., "Two-Dimensional Problems in Hydrodynamics and Aerodynamics", translated from the Russian and edited by C.K.Chu, H.Cohen and B.Seckler, John Wiley, 1965
- 4) 丸尾 孟, "水面滑走艇의 壓力抵抗에 關한 考察", 造船協會會報, 第78號, 1947
- 5) Cumberbatch, E., "Two-Dimensional Planing at High Froude Number", Journal of Fluid Mechanics, Vol.4, 1958
- 6) Squire, H.B., "The Motion of a Simple Wedge along the Water Surface", Proceedings of Royal Society A, Vol.243,1957
- 7) 丸尾 孟, "滑走艇의 流體力學的研究(第1法)", 造船協會論文集, 第91號, 1952
- 8) 丸尾 孟, "滑走艇의 流體力學的研究(第2法)", 造船協會論文集, 第92號, 1952
- 9) Tulin, M.P., "The Theory of Slender Surface Planning at High Speeds", Shifstechnik, Bd 14, 1957
- 10) Ogilvie, T.F., "Nonlinear High Froude Number Free-Surface Problems", Journal of Engineering Mathematics, Vol.1, 1967
- 11) Doctors, L.J., "Representation of Three Dimensional Planing Surfaces by Finite Elements", 1st ICNSH, 1975
- 12) Shin, M.S., Mori, K., "Numerical Computation of 2-Dimensional Waves behind a Hydrofoil", Jour. Soc. of Naval Arch. of Japan, vol.163, pp. 17-22, 1988
- 13) Fujita, K., "On More Accurate and Efficient Methods for the Free-Surface Flow Computations by the Finite Difference Method", Master Thesis, Hiroshima University, 1992 (in Japanese)
- 14) Mori, K., "New Treating of the Free Surface and Downstream Boundary Conditions in Numerical Computations of Free-Surface Flows", Proceedings of Seventh International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, pp. 205-208, 1992
- 15) Lungu, A., Mori, K., "New Finite Difference Method for Efficient and Accurate Free-Surface Flow Computation", Proceedings of the 6th Conference on CFD, Tokyo, pp. 389-393, 1992
- 16) Hinatsu, M., "Numerical Simulation of Unsteady Viscous Nonlinear Waves Using Moving Grid System Fitted on a Free Surface", Jour. of the Kansai Soc. of Naval Arch. Japan, vol.217, pp. 1-11, 1992
- 17) Kwag, S.H., Min, K.S., "Computation of Free Surface Flows around 3-D Hydrofoil and Wigley Ship by N-S Solver", Proceedings of Sixth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa University, U.S.A., 1993
- 18) 仲渡道夫, 小原茂明, "回流水槽에 定在波를 만드는 實驗", 西部造船會回報, 第65號, 1983
- 19) 仲渡道夫, 小原茂明, "回流水槽에 定在波를 만드는 實驗(第2報)", 西部造船會回報, 第68號, 1983