論 文

大韓造船學會論文集
第28券 第2號 1991年 10月
Transactions of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol.28, No.2, October 1991

유한차분법에 의한 임의 선체주위의 조파 Simulation

조규종*, 이강훈**, 이영길***

A Numerical Simulation of Ship Waves by Finite Difference Method

by
Kyu Jong Cho*, Kang-hoon Lee** and Young-Gill Lee***

요 약

일정속도로 항주하는 배에 의하여 생성되는 파를 유한차분법을 이용하여 수치적으로 시뮬레이션 하였다. 지배방정식으로는 3차원 운동량방정식 (Euler Eq.)과 연속방정식을 사용하였으며, 직교 좌표계상에서의 수치계산은 FTCS(forward time/central space)로 차분화하고 시간전진 방법(time marching scheme)으로 수행하였다.

좌표계로 staggered variable mesh system을 채용하여 기존의 계산조직을 개선하므로써, 유체 유동의 변화가 심한 선체주위에 계산 정도를 높이기 위하여 cell을 집중시켰다.

개선된 전산프로그램을 이용하여 Wigley, Series 60(C_b=0.6), 그리고 MS416B 산적화물선 선형등을 대상으로 수치계산을 수행하였으며, 그 결과들을 실험값과 비교하였다.

Abstract

A finite difference method based on MAC method is used to simulate free-surface waves around a ship. Euler equations and continuity equation are differentiated using the forward time and central space, and solved by time marching scheme. By the employment of variable mesh system in horizontal and vertical direction, the numerical accuracy of wave simulation results is grossly improved.

To verify the improvement of numerical accuracy, some numerical simulations are accomplished for Wigley, Series 60 (C_B=0.6)and a bulk carrier model. The computational results are compared to the various experimental data and show good agreements.

발표 : 1990년도 대한조선학회 추계연구발표회 ('90.11.10.)
접수일자 : 1991년 1월 8일, 재접수일자 : 1991년 8월 5일
* 정회원, 인하대학교 선박해양공학과
** 학생회원, 인하대학교 선박해양공학과
*** 정회원, 해사기술연구소

1. 서 론

배가 항주할 때 나타나는 조파현상과 조파저항은 배의 속도와 형상에 많은 영향을 받으며, 고속선의 경우에는 전체 저항의 반이상을 조파저항이 차지하기도 한다. 이와 같은 조파저항은 배의 형상을 약간 수정함으로써 상당히 감소시킬 수도 증가시킬 수도 있는데, 적절하게 설계된 선수벌브는 그러한 하나의 예이기도 하다. 그동안 조파저항이 적은 선형을 설계하는 문제에 관한 수 많은 논문과 이론들이 나왔으나, 이를 실제 선형의 기본설계시에 응용할 수 있는 방법들은 그다지 많지 않다. 그 이유는 대부분의 이론들이 비선형적인 특성을 지닌 조파문제를 선형적으로 단순화하여 다루고 있기 때문이다. 자유표면에서 비선형 경계조건을 고려하는 방법으로, 먼저 경계요소법(boundary element method)의 일종인 Rankine source 방법(Gadd[1])을 들 수 있으나, 저속 비대선형들에 대하여는 아직 정도 높은 계산결과를 보여주지 못하고 있다.

유한차분법 (Finite-Difference Method)의 일종인 MAC(Welch et al.[10])법이나 이를 개선한 방법들(Chan and Street [3], Viecelli[4], Nichols and Hirt[5])은 marker와 cell을 이용하여 자유표면에서 비선형 경계조건을 만족시킬 수 있도록 되어 있어서 비선형파를 시뮬레이션하기에 매우 적합한 방법들이다. 이러한 방법을 이용하여 여러 대학 및 연구기관에서 비선형파를 시뮬레이션 하고 있는데, 그중 일본의 동경대학에서도 MAC법을 이용하여 TUMMAC(Tokyo University Modified Marker and Cell method)이라는 프로그램을 개발하였는데, 다 [6, 7, 8]. 그 중에서 TUMMAC-Ⅳ는 임의의 3차원 선체에 의해 생성되는 파를 시뮬레이션하기 위한 프로그램으로써, 물체형상을 직각좌표계에서 직사각형의 물체경계 cell에 의해 나타내고 있기 때문에 좌표계 생성에 별 어려움이 없어 실용면에서 편리하다고 할 수 있겠다.

그러나, 등간격의 cell을 사용하고 있는 TUMMAC-Ⅳ로는 계산시간, 계산기 용량의 제약 등으로 인하여 cell의 갯수를 많게 할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 자유표면이나 물체경계면등 유체유동의 변화가 심한 부분에서는 cell의 크기를 작게하고 이로부터 떨어진 곳에서는 cell의 크기를 크게 함으로써 같은 수의 cell을 사용하여도 보다 정도가 높은 계산결과를 얻을 수 있도록 계산에 이용되는 좌표계를 보완하였다. 이러한 계산조직의 보완에 따른 계산정도의 향상은 Wigley, Series 60($C_b = 0.6$) 등의 경우의 계산결과와 실험결과를 비교 검토함으로써 입증되었다.

2. 지배 방정식

선체를 균일한 유동중에 놓여 있는 고정된 부유체로 가정하고 유동장을 계산함으로써 선체로 인하여 발생되는 파를 해석할 수 있다. 일반적으로 파는 선수 부근에서는 경계층의 영향을 거의 받지 않으나 선미 근처에서는 점성의 영향을 많이 받게 된다. 선박에 의하여 생성되는 파를 수치적으로 시뮬레이션 하기 위해서는 점성의 영향을 고려하여야 하지만, 본 논문에서는 점성의 영향이 비교적 적은 선수파만을 시뮬레이션 하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 비압축성 비점성 유동에 대한 보존형의 운동량 방정식(Euler eq.)과 연속방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \quad \text{(Continuity equation)} \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial(v)}{\partial t}+\frac{\partial(uv)}{\partial x}+\frac{\partial(v^2)}{\partial y}+\frac{\partial(vw)}{\partial z}=-\frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad \text{(Euler equations)}$$

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

식 (1),(2)에서 (x,y,z) : 직교 좌표계

(u,v,w) : x,y,z 각 방향의 속도 성분

ρ : 밀도

g : 중력 가속도

$\Psi : \frac{P}{\rho}$

P : 압력

3. 계산방법

3.1 유한차분 표현과 계산법의 구성

직교 좌표계(x,y,z)의 원점은 자유표면과 선수단이 만나는 점이고, x축은 선체의 길이 방향을, y축은 선체의 폭방향을, z축은 수직 상방향을 (+)방향으로 하였다. 그리고, 연속방정식의 만족도를 높여 주기 위하여 staggered-variable mesh를 사용하였으므로, Fig. 1에서와 같이 압력은 cell의 중앙점에서 속도들은 cell의 각 면들의 중앙점에서 정의된다.

Euler 방정식에서 대류항을 제외하고 시간에 대해 전진차분, 공간에 대해 중심차분을 한 후 (FTCS) 정리하면 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$u^{n+1}_{i+1,j,k} = \xi_{i+1,j,k} - \frac{\Psi_{i+1,j,k} - \Psi_{i,j,k}}{DX} DT$$

$$v^{n+1}_{i,j+1,k} = \eta_{i,j+1,k} - \frac{\Psi_{i,j+1,k} - \Psi_{i,j,k}}{DY_j} DT \qquad (3)$$

$$w^{n+1}_{i,j,k+1} = \zeta_{i,j,k+1} - \frac{\Psi_{i,j,k+1} - \Psi_{i,j,k}}{DZ_k} DT$$

$$\xi_{i+1,j,k} = u_{i+1,j,k} - DT \cdot UC_{i+1,j,k}$$

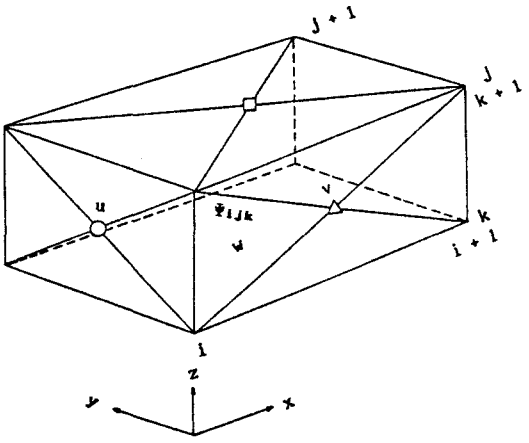


Fig. 1 Staggered mesh system

$$\eta_{i,j+1,k} = v_{i,j+1,k} - DT \cdot VC_{i,j+1,k} \qquad (4)$$

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

식 (3),(4)에서 아래첨자 i,j,k : cell의 위치

DT : 시간증분

DX, DY_j, DZ_k : 압력점들 사이의 거리

UC, VC, WC : 대류항들 (convection terms)

윗첨자(n+1) : (n+1)time step을 나타내고 윗첨자가 없는 변수들은 윗첨자 (n)이 생략된 경우이다.

식 (3)과 연속방정식을 이용하면, 압력에 대한 차분화된 Poisson 방정식은 다음 식(5)[6,7]와 같이 유도된다.

$$\Psi_{i,j,k} = \frac{1}{2}\left\{\frac{1}{DX^2} + \frac{1}{DY1 \cdot DY2} + \frac{1}{DZ1 \cdot DZ2}\right\}^{-1}$$

$$\times\left\{\frac{\Psi_{i+1,j,k} + \Psi_{i-1,j,k}}{DX^2} + \frac{DY1 \cdot \Psi_{i,j+1,k} + DY2 \cdot \Psi_{i,j-1,k}}{DY1 \cdot DY2 \cdot {}^1/_2(DY1+DY2)}\right.$$

$$\left. + \frac{DZ1 \cdot \Psi_{i,j,k+1} + DZ2 \cdot \Psi_{i,j,k-1}}{DZ1 \cdot DZ2 \cdot {}^1/_2(DZ1+DZ2)} - R_{i,j,k}\right\} \qquad (5)$$

여기서,

$$R_{i,j,k} = \frac{\xi_{i+1,j,k} - \xi_{i,j,k}}{DT \cdot DX} + \frac{\eta_{i,j+1,k} - \eta_{i,j,k}}{DT \cdot DY_j} + \frac{\zeta_{i,j,k+1} - \zeta_{i,j,k}}{DT \cdot DZ_k} \qquad (6)$$

$$DY1 = {}^1/_2(DY_{j-1} + DY_j)$$
$$DY2 = {}^1/_2(DY_j + DY_{j+1})$$
$$DZ1 = {}^1/_2(DZ_{k-1} + DZ_k) \qquad (7)$$
$$DZ2 = {}^1/_2(DZ_k + DZ_{k+1})$$

압력에 대한 Poisson 방정식인 식(5)는 다음 식(8)에 의해서 반복적으로 풀린다.

$$\Psi^{m+1}_{i,j,k} = \Psi^{m}_{i,j,k} - \frac{\left(\omega D^{m}_{i,j,k}\right)}{2DT\{1/DX^2 + 1/(DY1 \cdot DY2) + 1/(DZ1 \cdot DZ2)\}} \qquad (8)$$

여기서,

$$D^{m}_{i,j,k} = \frac{u^{m}_{i+1,j,k} - u^{m+1}_{i,j,k}}{DX} + \frac{v^{m}_{i,j+1,k} - v^{m+1}_{i,j,k}}{DY_i} + \frac{w^{m}_{i,j,k+1} - w^{m+1}_{i,j,k}}{DZ_k} \quad (9)$$

식(8)에서 ω : 완화계수

$D_{k,j,k}$: (i,j,k)cell의 발산(divergence)

윗첨자 m : 반복횟수(iteration number)

식(3)에서 대류항인 UC, VC, WC들은 수치적 안정성을 좋게 하기 위하여 2차 상류차분과 중심차분의 합성으로 차분화(hybrid scheme)되었다(Hirt et al.[12]).

Fig. 2는 계산순서를 흐름도(flow chart)로 나타낸 것으로 일련의 반복과정에 의해 정상상태의 해에 도달된다. 우선, 압력의 Poisson 방정식인 식(5)가 경계조건하에 반복적으로 풀리고, 이를 초기조건으로 이용하여 운동량 방정식인 식(3)으로 부터 새로운 속도성분들이 결정된다. 이들 새로운 속도들을 이용하여 Poisson 방정식인 식(5)의 source항($R_{i,j,k}$)가 계산되어지며, 이로써 또 그 다음 시간단계(time step)에서의 압력계산이 반복되어진다.

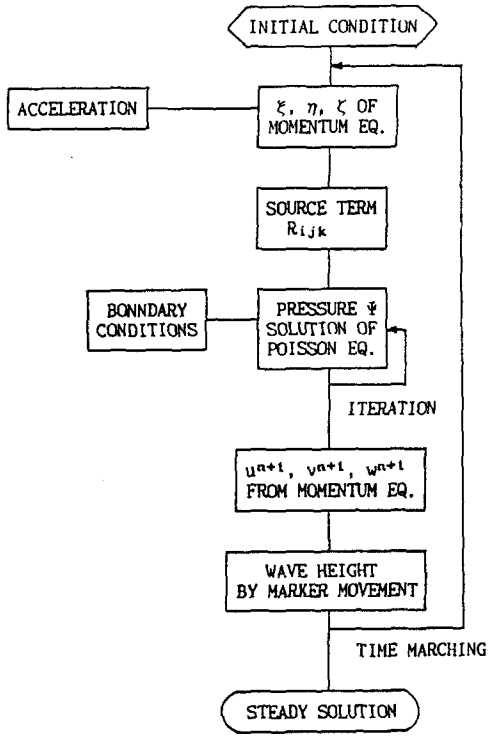


Fig. 2 Block diagram

3.2 물체 경계 Cell의 설정

직사각형 cell의 구조를 이용하여 3차원 물체경계조건을 다룰 때에는 많은 어려움이 있으므로, 임의의 3차원 선체는 Fig. 3과 같이 단순화된다. 선체는 (x,y)평면의 수선들(waterlines)과 (y,z)평면의 횡절선들(station lines)로 표현되는데, 수선은 연속적인 직선으로 표현되고 횡절선은 하나의 cell에서 수직방향의 변화가 무시된 직선으로 표현된다. 모든 cell들은 F-cells(fluid cells), B-cells(body boundary cells), E-cells(empty cells)로 분류되며, 각 cell에 알맞도록 계산법이 구성되어 있다.

3.3 물체 경계조건

물체경계에서는 free-slip condition을 적용하

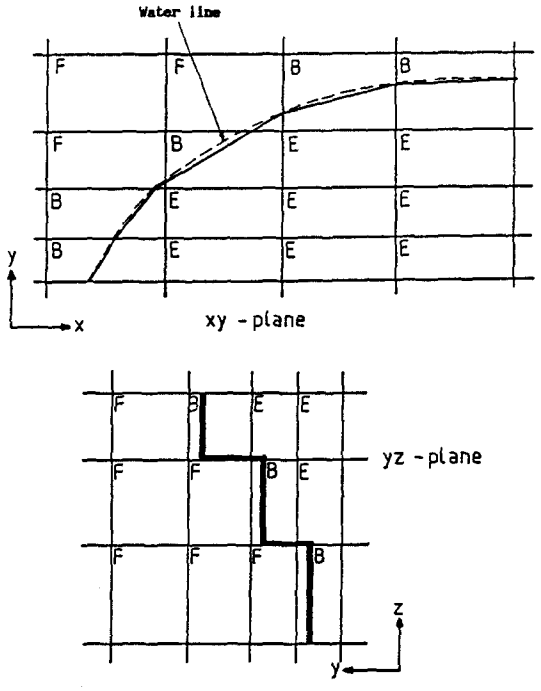


Fig. 3 Simplification of a hull form on horizontal (X−Y)and vertical (X−Z)planes

였으므로 물체경계 cells(B-cells)에서 다음 3조건을 만족하도록 하였다.

1) 물체표면에 수직방향 속도는 0(zero)이다.
2) 물체표면에 접한 속도는 물체표면 가까이에서 normal gradient를 갖지 않는다.
3) B-cells에서의 발산은 0(zero)이다.

그리고, B-cell에서의 압력 반복계산식은 F-cell에 대한 식(8) 대신 다음 식(10)을 사용함으로써, B-cell에서 주위의 압력점들의 유무에 관계없이 압력계산이 가능하게 한다. (Viecelli(1971)).

$$\Psi^{m+1}_{i,j,k} = \Psi^{m}_{i,j,k} - \frac{\omega}{2\delta \cdot DT}(V_P \cdot n) \qquad (10)$$

여기서, V_P와, n은 Fig. 4에서와 같이 B-cell의 segment 중심에서 유체속도 벡터와 단위법선 벡터이며, $\delta = 1/DX + 1/DY_i + 1/DZ_k$이다.

식 (10)에서 압력은 $(V_P \cdot n)$가 "0"(zero)이 되었을 경우 수렴하게 되므로, 이는 B-cells에서 유체부분의 발산이 "0"이 되며, 또한 물체경계면을 가로지르는 유동이 없다는 것을 의미한다.

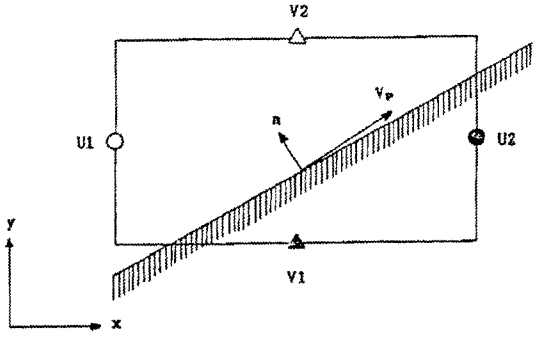


Fig. 4 Definition sketch for boby bounday condition on horizontal plane

3.4 자유표면조건

자유표면에서 점성응력(viscous stress)과 표면장력(surface tension)의 효과를 무시하면, 자유표면의 위치를 $Z = \xi$라 할때 이 위치에서 동력학적 조건과 운동학적 조건은 다음의 식(11),(12)와 같다.

$$\Psi = \Psi_0 \qquad \text{(동력학적 조건)} \qquad (11)$$

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u\frac{\partial \xi}{\partial x} + v\frac{\partial \xi}{\partial y} + w$$

(운동학적 조건) (12)

여기서, $\Psi_0 = P_0/\rho$, P_0: 대기압(atmospheric pressure)

식(11)의 경계조건과 "irregular star"(Chan and Street[3])를 사용하면, 자유표면 근처에서 압력은 3차원인 경우 다음의 식(13)에 의해 계산된다.

$$\Psi_{i,j,k} = \frac{\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4\eta_5\eta_6}{\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4 + \eta_3\eta_4\eta_5\eta_6 + \eta_1\eta_2\eta_5\eta_6} \times \left\{ \frac{\eta_2\Psi_1 + \eta_1\Psi_2}{\eta_1\eta_2(\eta_1+\eta_2)} + \frac{\eta_4\Psi_3 + \eta_3\Psi_4}{\eta_3\eta_4(\eta_3+\eta_4)} + \frac{\eta_6\Psi_5 + \eta_5\Psi_6}{\eta_5\eta_6(\eta_5+\eta_6)} - \frac{1}{2}R_{i,j,k} \right\} \qquad (13)$$

여기서, η_1, η_2, $\eta_3\cdots$: Fig. 5에서와 같이 자유표면 근처에서 압력점들 사이의 거리

식(12)에 의해 표현된 운동학적 조건도 자유표면에 놓여진 marker 입자들을 사용하여 만족되어진다. Marker 입자들은 Fig. 5에서와

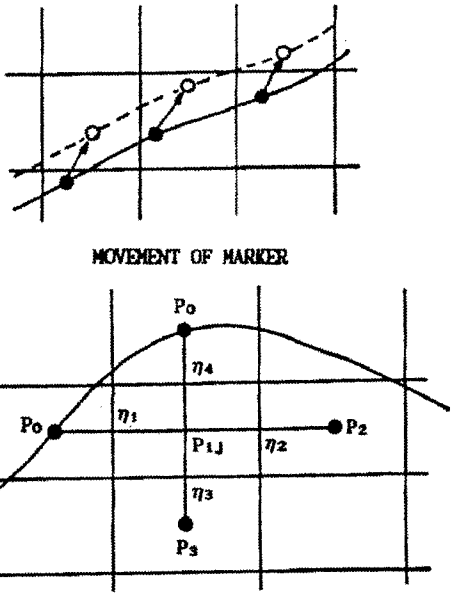


Fig. 5 Marker Movement and "irregular star" in 2D case

같이 Lagrangian 방식으로 움직여지며, 이들의 각 시간단계에서의 새로운 위치는 새로운 자유표면을 결정한다.

(n)시간단계에서의 입자들의 위치를 (x_i, y_i, z_i)이라 하고, 이 지점에서의 속도를 (u_i, v_i, w_i)라 하면, (n+1)시간단계에서의 새로운 위치는 식(14)에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + DT\cdot u_i \\ y_i^{n+1} &= y_i^n + DT\cdot v_i \\ z_i^{n+1} &= z_i^n + DT\cdot w_i \end{aligned} \tag{14}$$

3.5 기타 경계조건

1) 중앙면 경계조건(Centerplane condition)

선체주위의 유동이 중앙면(centerplane)에 대하여 좌우대칭이므로 Fig. 6과 같이 배의 중앙면에 경계조건을 적용할 수 있다. Fig. 6에서 빗금친 부분을 포함하는 cell(j=1)들은 j=2에서의 물리량을 구하기 위해 부가된 영역들로써, 중앙면에서의 경계조건은 식(15)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Psi_{i,1,k} &= \Psi_{i,3,k} \\ v_{i,2,k} &= -v_{i,3,k} \\ \eta_{i,2,k} &= -\eta_{i,3,k} \end{aligned} \tag{15}$$

2) 유입 경계조건(Inflow boundary condition)

i=1에서 일정한 유입속도가 주어지며, i=1에서의 압력은 i=2에서의 압력과 같게 놓는다.

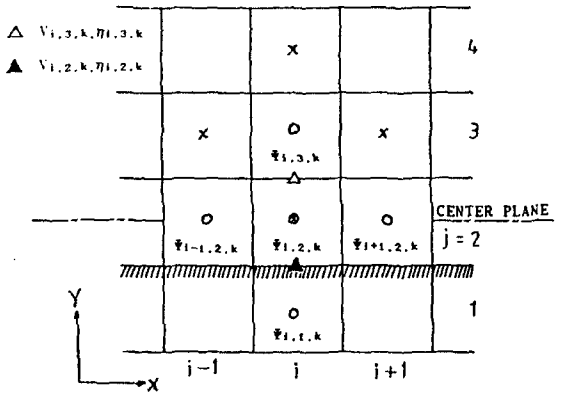


Fig. 6 Pressure point on centerplane boundary

3) 유출 경계조건(Outflow boundary condition)

i=NCX-1(NCX는 x방향 cell의 수)의 속도, 압력으로 부터 유선을 따라 i=NCX의 속도, 압력을 외삽하여 구한다.

4) 저면 경계조건(Bottom boundary condition)

k=1의 저면경계에서는 정수압이 주어지고, k=1에서의 속도는 k=2에서의 속도와 같게 놓는다.

5) 측면 경계조건(Side boundary condition)

j=NCY(NCY는 y방향 cell의 수)에서의 속도, 압력은 j=NCY-1에서의 속도, 압력과 같게 놓는다.

4. 계산예

4.1 계산조건

수치계산은 Wigley, Series 60($C_b=0.6$), 그리고 MS416B(재화중량 24,300톤, 수선간장 176.022m, $C_b=0.75$인 산적화물선에 대한 척도 1/70의 모형)선형등 모두 세개의 선형에 대하여 수행되었으며, 배의 주요요목들은 Table 1에, 계산에 사용된 조건들은 Table 2에 정리되었다.

Series 60($C_b=0.6$)선형은 선수부분과 전체길이에 대하여 계산되었으며, Wigley와 MS-416B선형은 선수부분에 대해서만 계산되었다.

모형선 속도로는, Series 60($C_b=0.6$)선형은 선수부분의 계산에서는 $F_n=0.189$, 전체길이의 계산에서는 $F_n=0.220$, Wigley선형은 $F_n=0.289$, MS416B선형은 설계속도에 해당되는 $F_n=0.173$을 각각 선택하였다.

Table 1 Principal Particulars of Models

Name of hull	Wigley	Series 60	MS416B
Length (L_{pp}) (m)	2.5	2.5	2.515
Breadth (B) (m)	0.25	0.333	0.345
Draft (d) (m)	0.156	0.133	0.143
Computed Froude number	0.289	0.189(fore body) 0.220(full length)	0.173

4.2 계산 결과

4.2.1 Wigley 모형 (선수부)

아래의 계산결과들은 같은 갯수의 cell과 같은 크기의 계산영역을 사용하여 Wigley 선형에 대하여 계산한 결과들이다.

Fig. 7에서는 z방향에, Fig. 8에서는 y,z방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 Wigley 선형의 파면등고선도(wave contour maps)를 나타냈고, Fig. 9에서는 이들 파면등고선도가 실험치(Tokyo Univ.[6])와 비교되었으며, Fig. 10에서는 선수 선측파형들이 실험치(Tokyo Univ.[6])와 비교되었다.

파고의 단위는 균일한 흐름의 수두(water head)인 $H=U^2/2g$로 무차원화 되어 있다. 계산이 시작되어 설정속도까지는 0.0m/s로부터 1.429m/s까지 Table 2의 계산 조건하에서 500

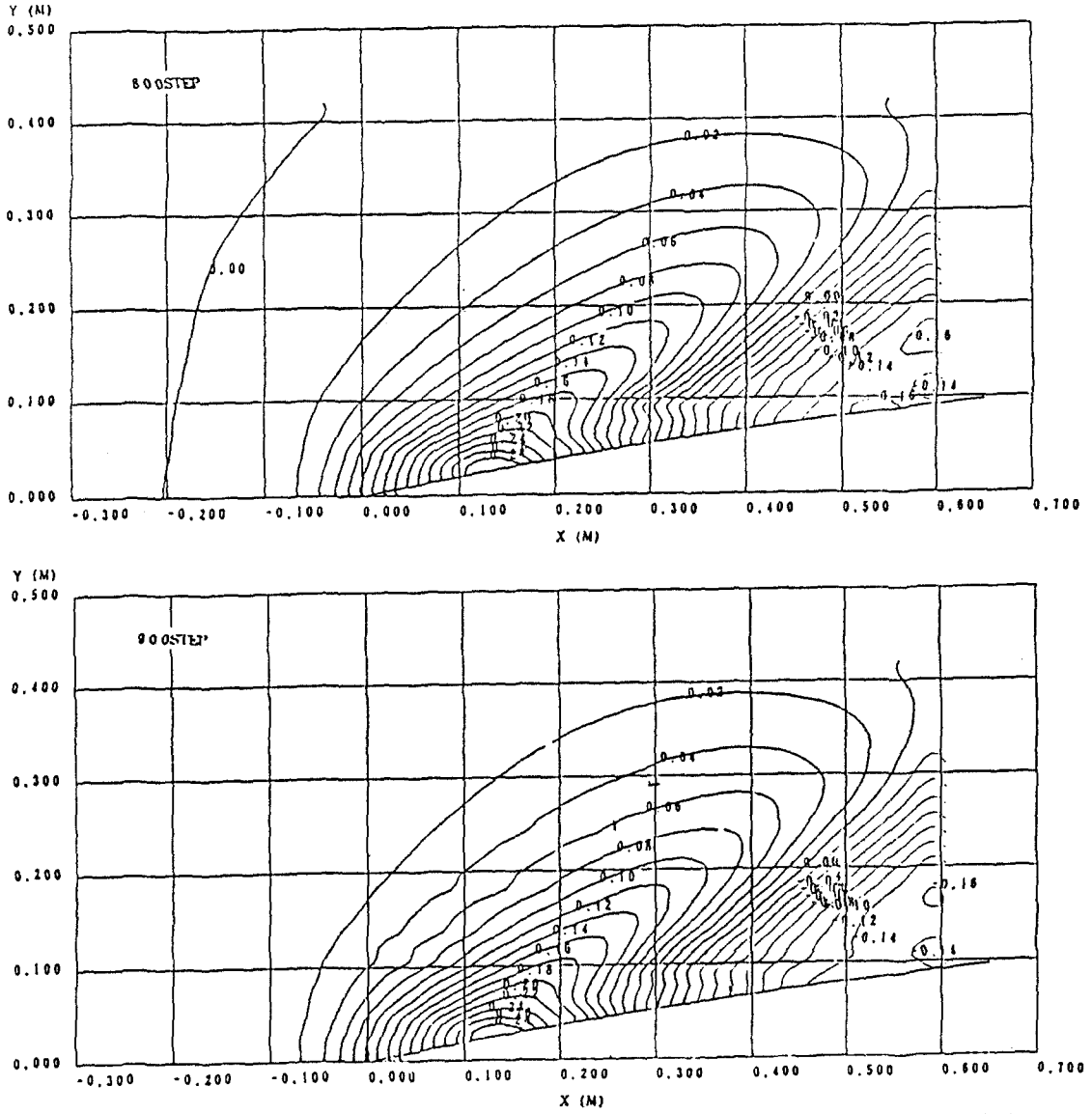


Fig. 7 Wave contour maps of forebody of Wigley's hull obtained by using variable mesh in z-direction $DX \times DY \times DZ_k = 25 \times 15 \times (7.8 \sim 44.6)$mm

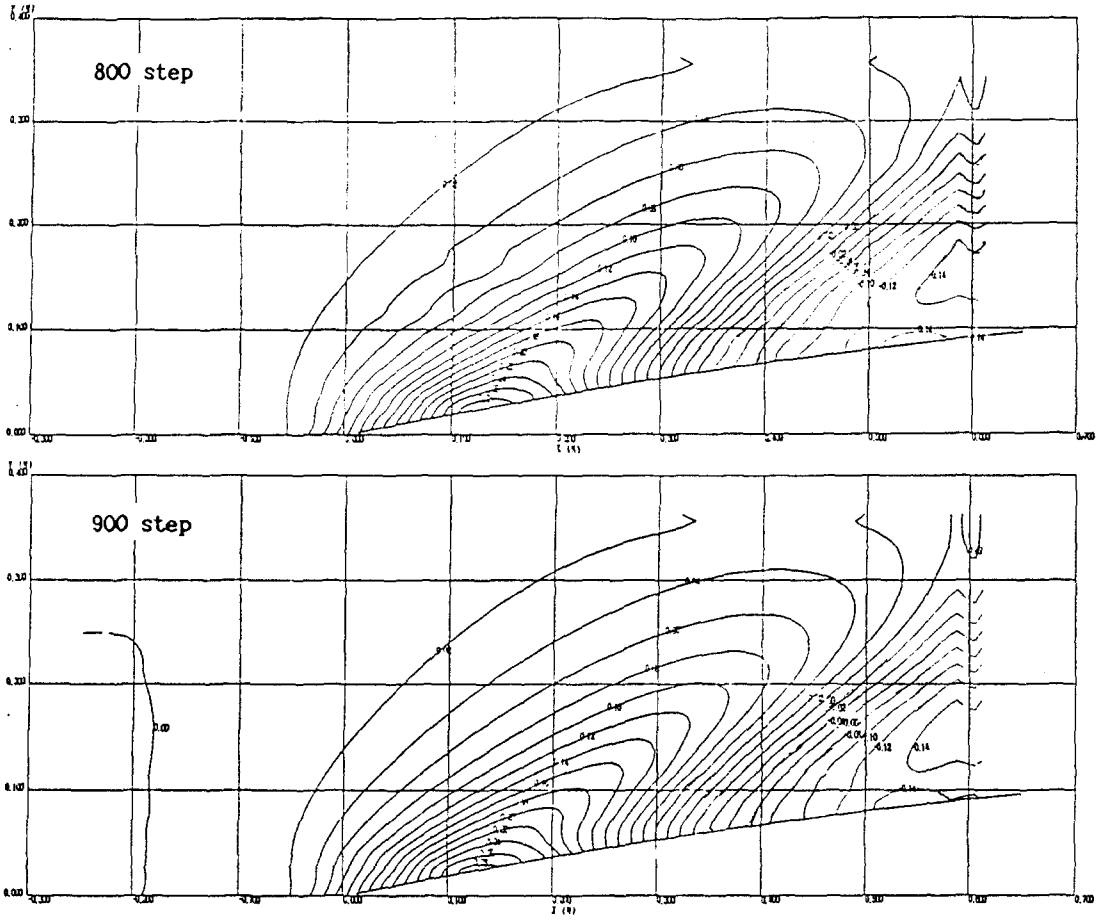


Fig. 8 Wave contour maps of forebody of Wigley's hull obtained by using variable mesh in y and z directions. $DX \times DY_j \times DZ_k = 25 \times (9.1-22.5) \times (7.8-44.6)$mm

Table 2 Conditions of Computation

Name of hull		Fore body of a wigley full	Fore body of a series60 ($C_b=0.6$)	series 60 ($C_b=0.6$) (full length)	MS416B (forebody)
Domain of computation	length (m)	0.875	1.000	4.0	1.75
	breadth (m)	0.415	0.375	0.630	0.344
	depth (m)	0.376	0.365	0.356	0.345
Cell size	DY (mm)	25	25	20	25
	DY (mm)	15(9.1-22.5)	7.5(5.51-12.15)	6.23-15.26	6.45-15.64
	DZ (mm)	7.8-44.6	4.03-28.6	6.67-40.95	7.15-40.86
Approximate number of used cell		19,600	60,000	240,000	98,000
Time increment	DT (s)	0.00328	0.00567	0.00367	0.00582
Time steps for accelration		500	300	400	600
Total time steps		900	500	600	600
Combination factor W		0.5	0.5	0.5	0.5
Relaxation factor W		1.5	1.5	1.5	1.5
Froude number Fn		0.289	0.189	0.220	0.173
Speed of advance (m/s)		1.429	0.891	1.089	0.8606

시간단계동안 가속되었다.

4.2.2 Series 60 모형 (선수부)

아래의 계산결과들은 같은 갯수의 cell과 같은 크기의 계산영역을 사용하여 Series 60 모형에 대하여 계산한 결과들이다.

Fig. 11에서는 z방향에, Fig. 12에서는 y,z방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 Series 60의 파면등고선도(wave contour maps)를 나타냈고, Fig. 13에서는 계산된 선수 선측파형을 실험치(KIMM[18])와 비교하였다.

4.2.3 Series 60 모형 (전장)

아래의 계산결과는 y,z방향에 variable mesh

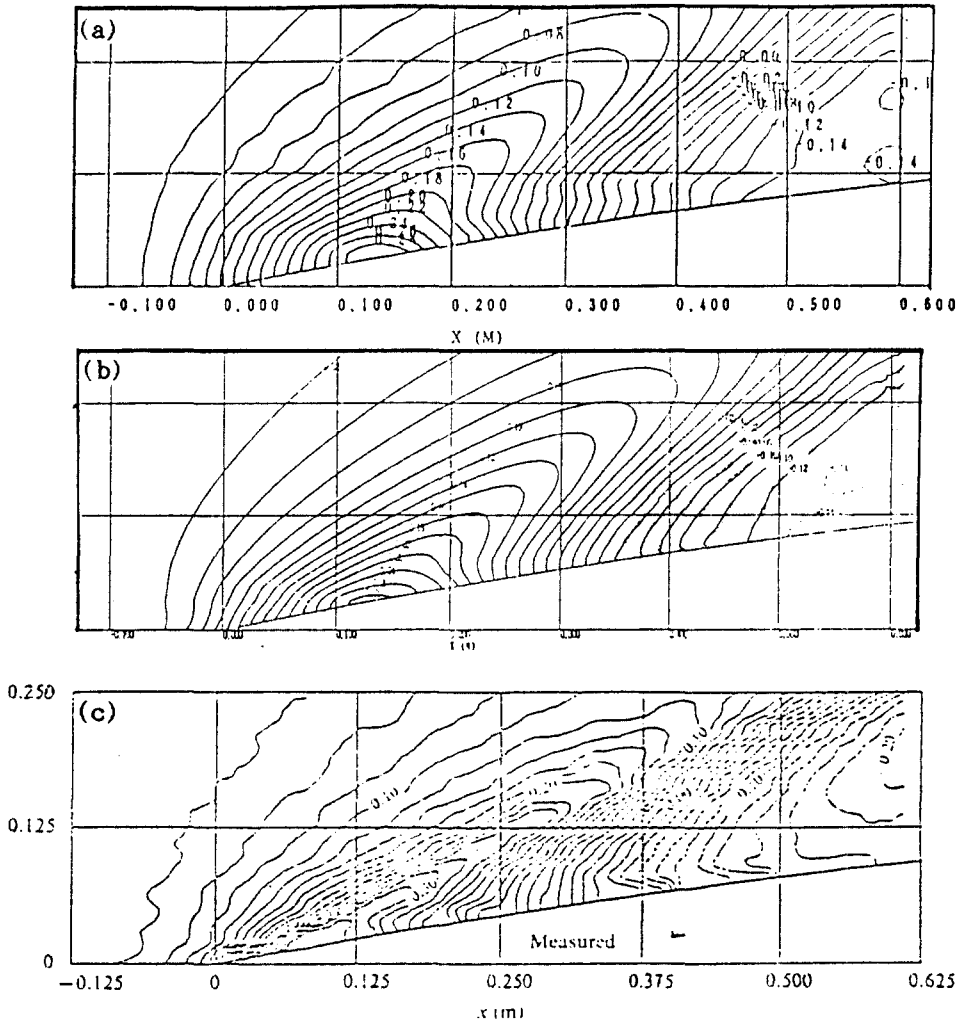


Fig. 9 Comparison of wave contour maps for the forebody of a Wigley's hull at Fn=0.289, (a);computed by using variable mesh in zdi rections at 900th time step, (b);comp uted by using variable mesh in y and zdi rection sat 900th time step, (c);Tokyo Univ.[6]. The interval of contours is 0.02

를 사용하여 계산한 결과들이다.

Fig. 14에서는 본 계산에서 사용된 Series 60 (C_b=0.6)모형을 위한 grid system의 대표적인 단면들을 (y,z), (x,z), (x,y)평면에 나타냈으며, 선체 중앙종단면에서의 DY_i는 선체 중앙종단면으로 부터 선폭방향으로 B/2 만큼 떨어진 곳에서의 DY_i에 1/1.5 정도이다. Fig. 15에서는 y,z 방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 파면등고선도를 가속이 끝난 400 시간단계부터 계산이 끝나는 600 시간단계까지 100시간단계 간격으로 나타냈으며, Fig. 16에서는 계산된 선수 선측파형을 실험치, 그리고 first-order thin ship theory 로부터 구한 값 (KIMM [18])과 비교하였다.

4.2.4 MS416B 모형 (선수부)

아래의 계산결과는 y,z방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 결과이다.

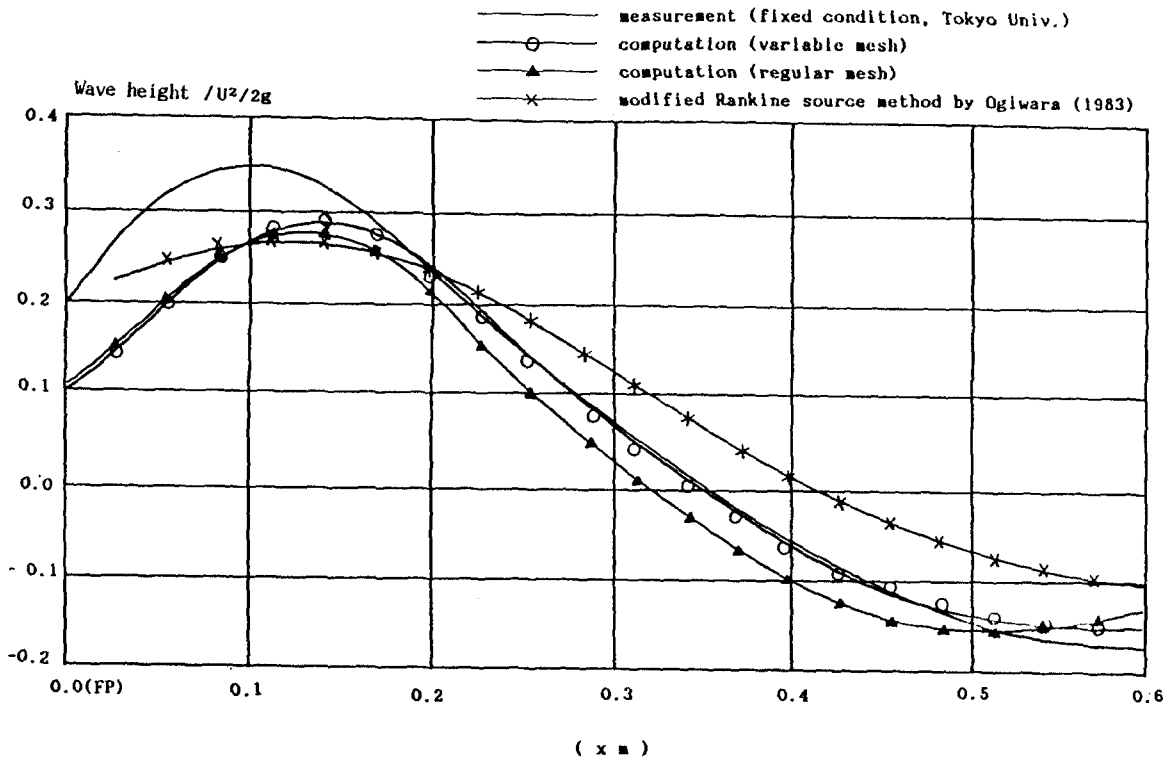


Fig. 10 Comparison of wave profiles on the hull surface of the forebody of a wigley's hull at Fn=0.289

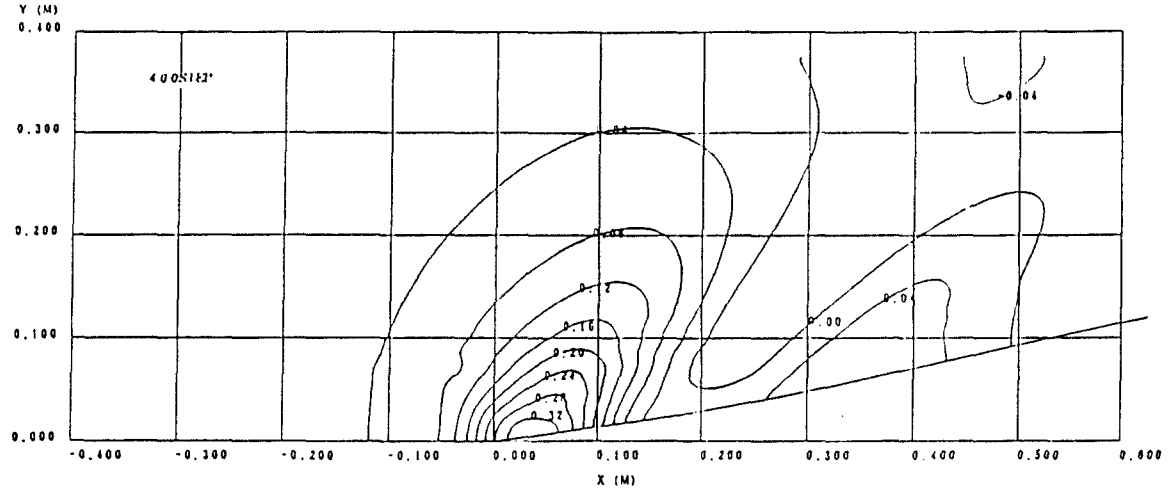
Fig. 17에서는 본 계산에 사용된 MS416B 모형을 위한 grid system의 대표적인 단면들을 (y,z), (x,z), (x,y)평면에 나타냈으며, Fig. 18에서는 y,z방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 파면등고선도를 가속이 끝난 600 시간단계부터 계산이 끝나는 800시간단계까지 100 시간단계 간격으로 나타냈으며, Fig. 19에서는 MS416B 모형의 중앙종단면으로 부터 0.22m (선측에서 0.0475m, 선폭의 약 13.8%)떨어진 일직선상의 파도의 측면도(wave profile)를 실험치와 비교하였다.

5. 계산결과와 시험결과의 비교 검토

4.2.1과 4.2.2에서는 Wigley 선형과 Series 60 선형을 대상으로 같은 갯수의 cell과 같은 크기의 계산영역에서 z방향만 variable를 사용한 경우와 y,z방향을 variable mesh를 사용한 경우를 비교하고 있다. Fig. 10과 Fig. 13에 나타난 바와 같이 y,z방향에 variable mesh를 사용한 경우가 z방향만 variable mesh를 사용한 경우보다 실험치(Tokyo Univ.[6], KIMM[18])와 더욱 일치함을 보여주고 있으며, Fig.10에서는 modified Rankine source 방법(Dawson[14])에 의한 결과치 보다 본 논문에 의한 결과치가 실험치(Tokyo Univ.[6])에 더 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

4.2.3에서는 Series 60(C_b=0.6)선형을 전장(full length)에 대하여 y,z방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 결과들을 보여주고 있다. Fig. 16에서는 선측파형이 실험치와 잘 일치하고 있으며, 얇은배 선형이론에 의한 결과(KIMM[18])보다 좋은 결과를 보여주고 있다.

4.2.4에서는 C_b가 약 0.75인 산적화물선 선형



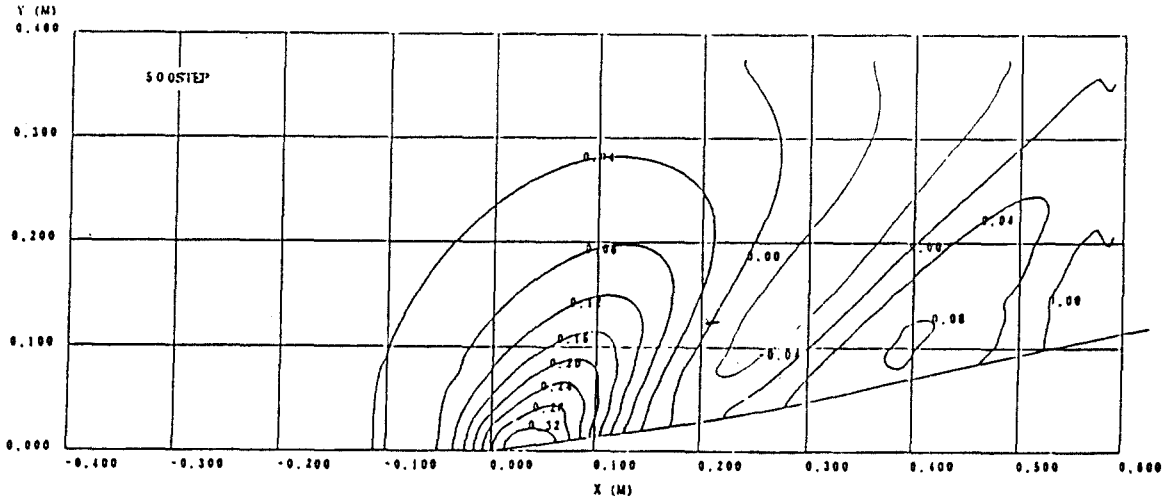
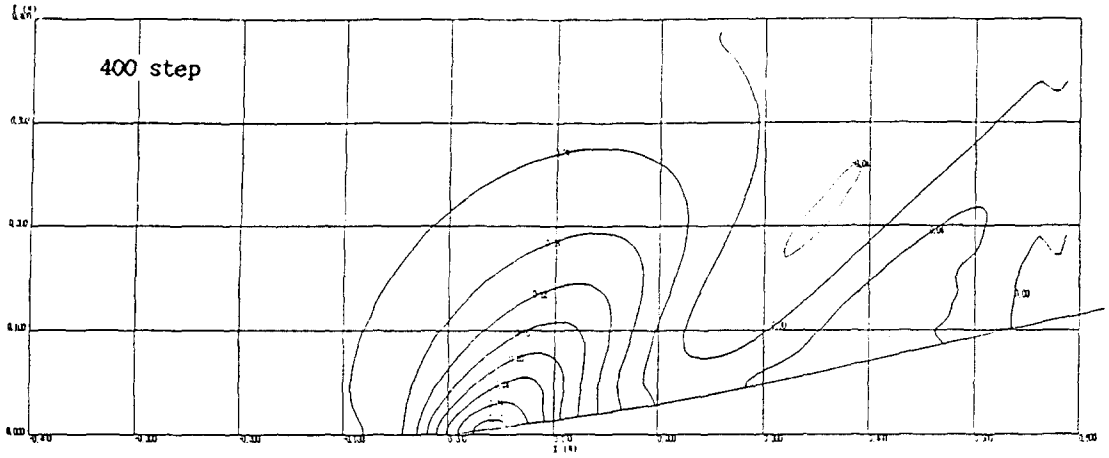


Fig. 11 Wave contour maps of forebody of Series 60 obtained by using variable mesh in z−direction
$DX \times DY \times DZ_k = 25 \times 7.5 \times (4.03 \sim 28.6)$mm



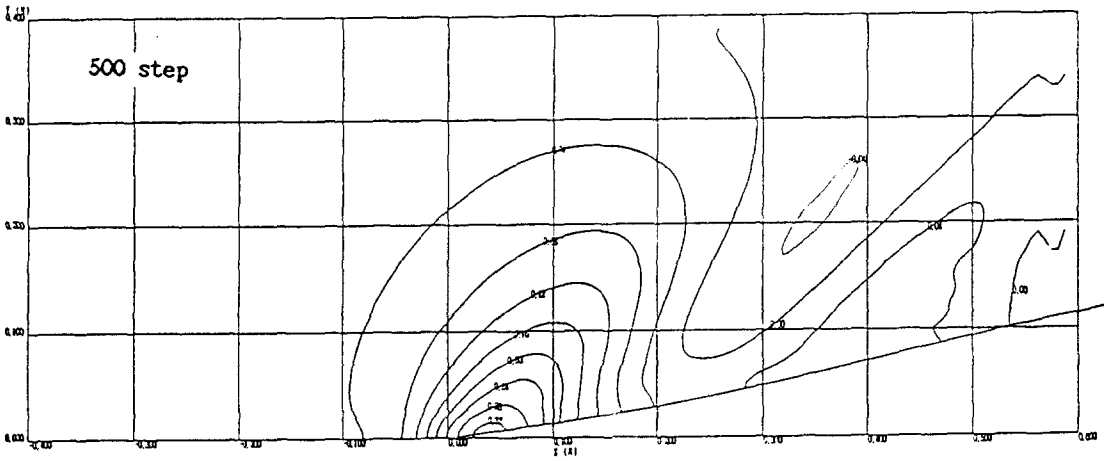


Fig. 12 Wave contour maps of forebody of Series 60 obtained by using variable mesh in y and z directions $DXDY_j \times DZ_k = 25 \times (5.51 - 12.15) \times (4.03 - 28.6)$mm

인 MS416B선형을 대상으로 y,z방향에 variable mesh를 사용하여 계산한 결과들이 나타나 있다. Fig. 19에서는 선체 중앙종단면에서 부터 0.22m 떨어진 수직종단면에서 파도의 측면도를 구속상태의 모형선에 대한 실험치와 비교하고 있으며, 정량적인면에서는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 모든 계산은 IBM PC-386에 의해 수행되었으며, 계산시간은 Table 2의 조건하에서 Wigley 선형 선수부에 대해 약 5시간, Series 60 선형 선수부에 대해 약 7시간, Series 60 선형 전장에 대해 약 30시간, 그리고 MS416B 선형 선수부에 대해 약 20시간이 소요되었다.

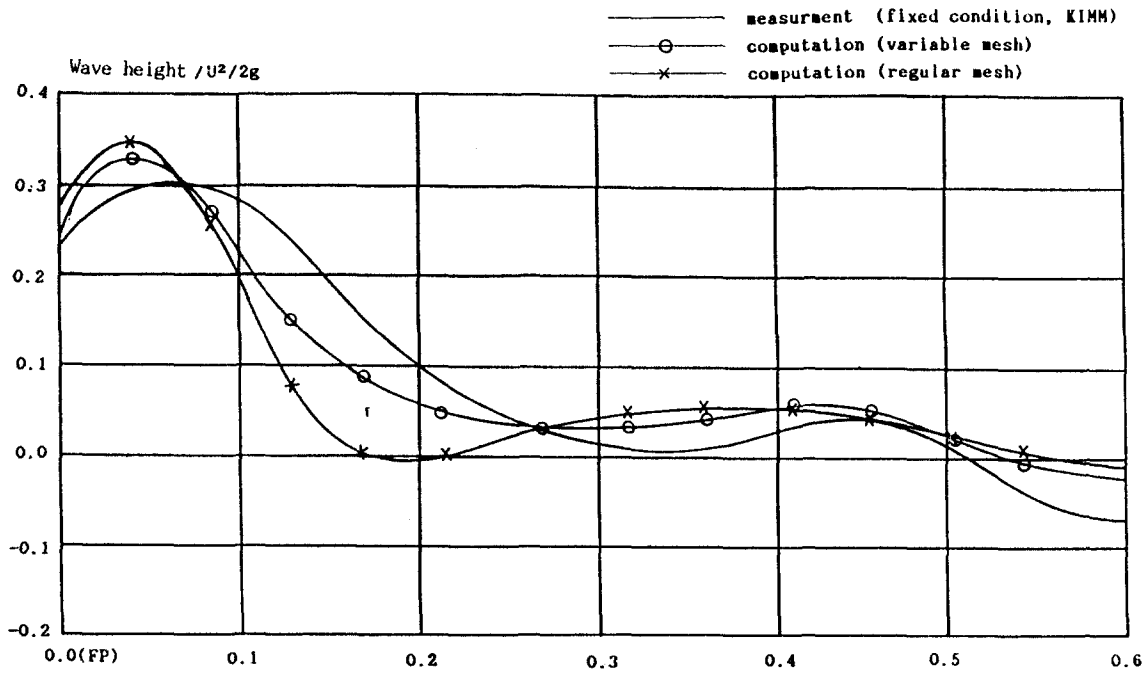


Fig. 13 Comparison of wave profiles on the hull surface of the forebody of a Series 60 at Fn=0.18

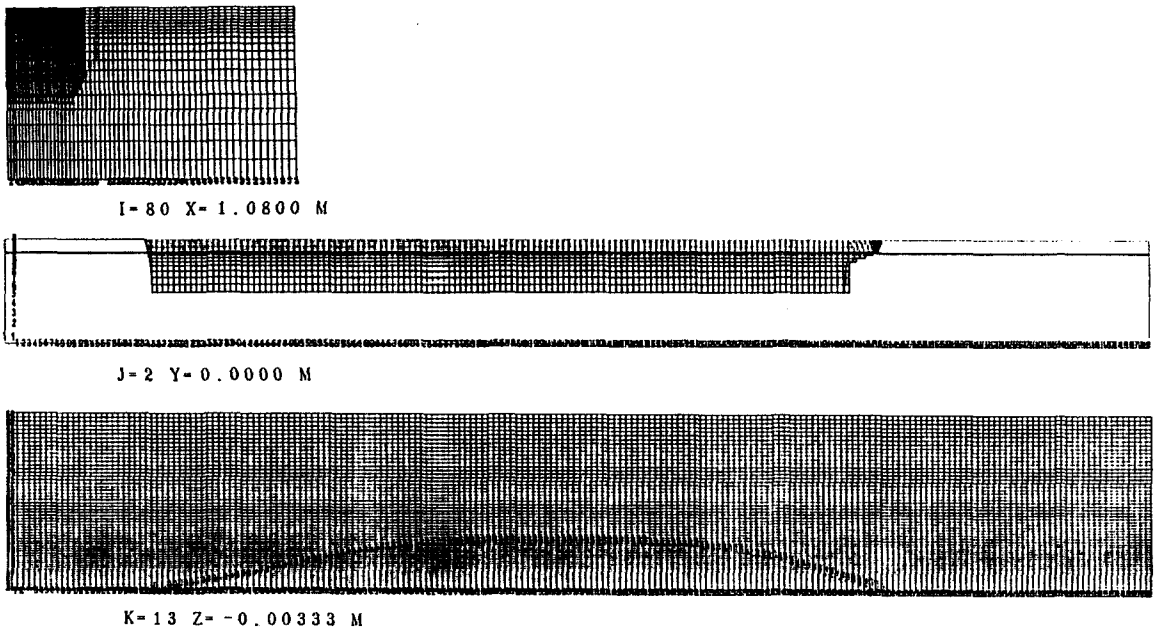


Fig. 14 Cell division of the full length of Series 60 (C_b=0.6)

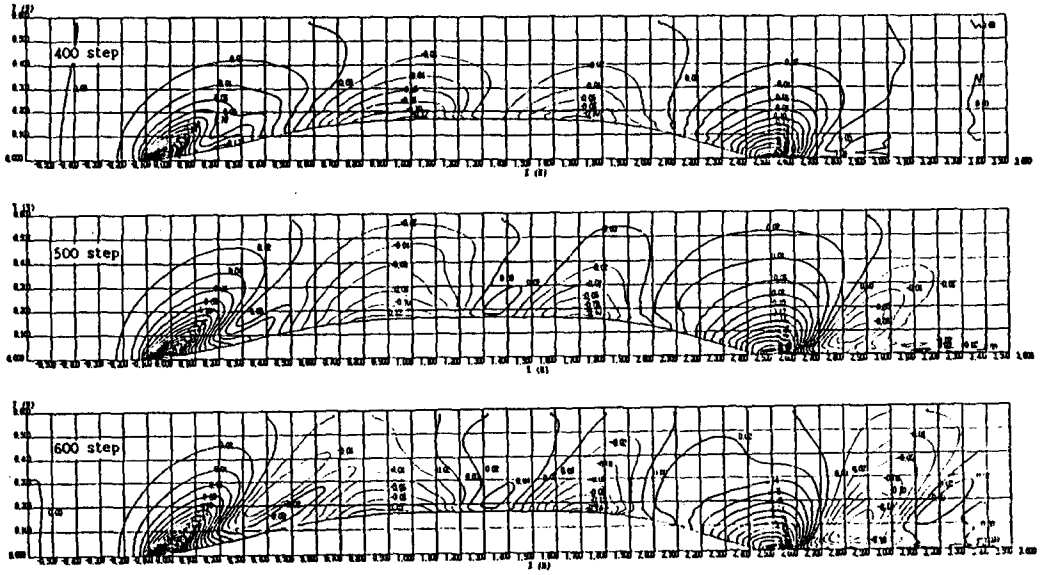


Fig. 15 Time evolution of wave contour map of the Series 60 (full length). The interval of contours is 0.04 The uniform stream velocity is accelerated up to the 400th time step. Fn=0.220

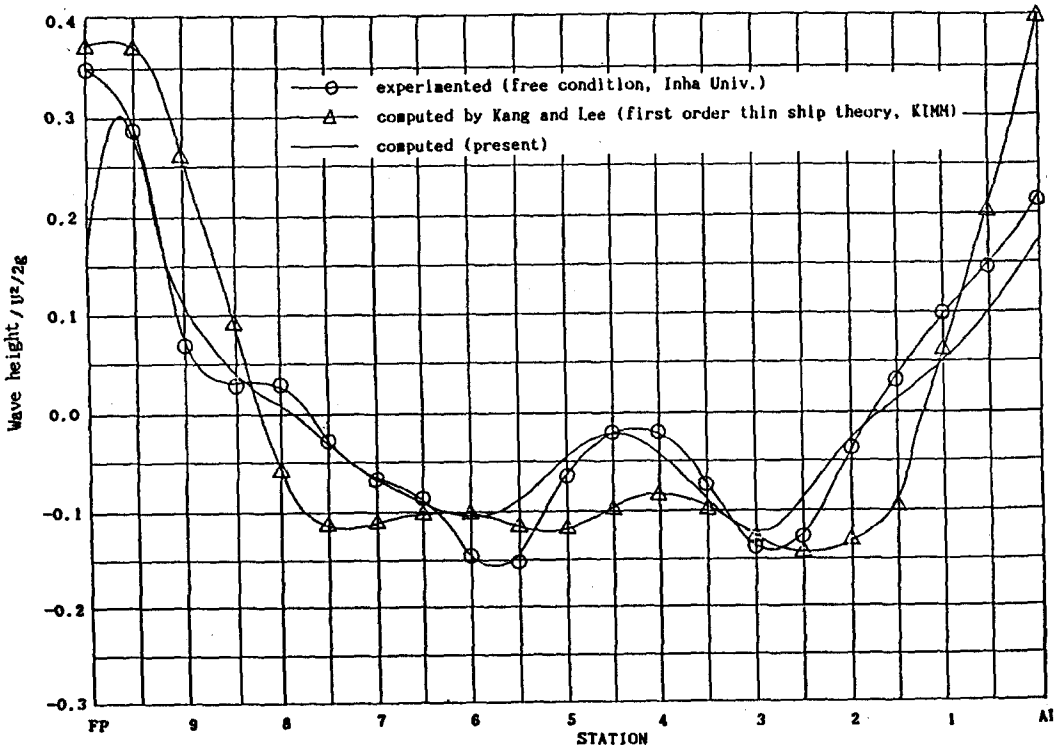
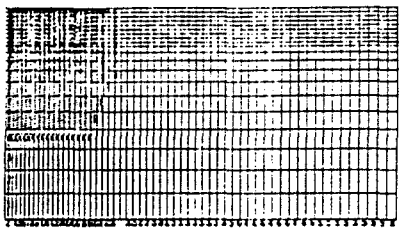
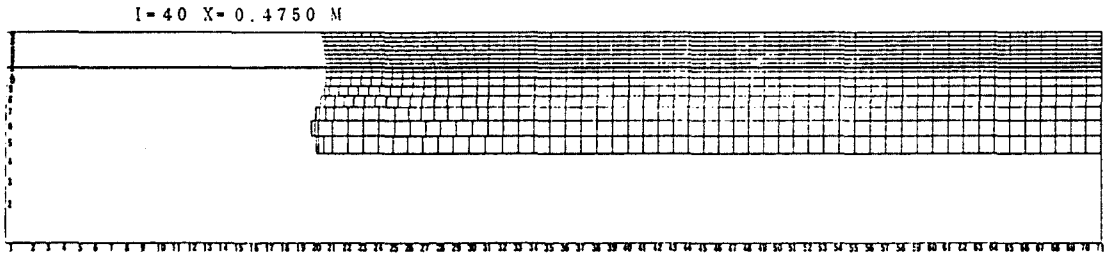


Fig. 16 Comparison of wave profiles on the hull surface of the full length of Series 60 (C_b=0.6) at Fn=0.22





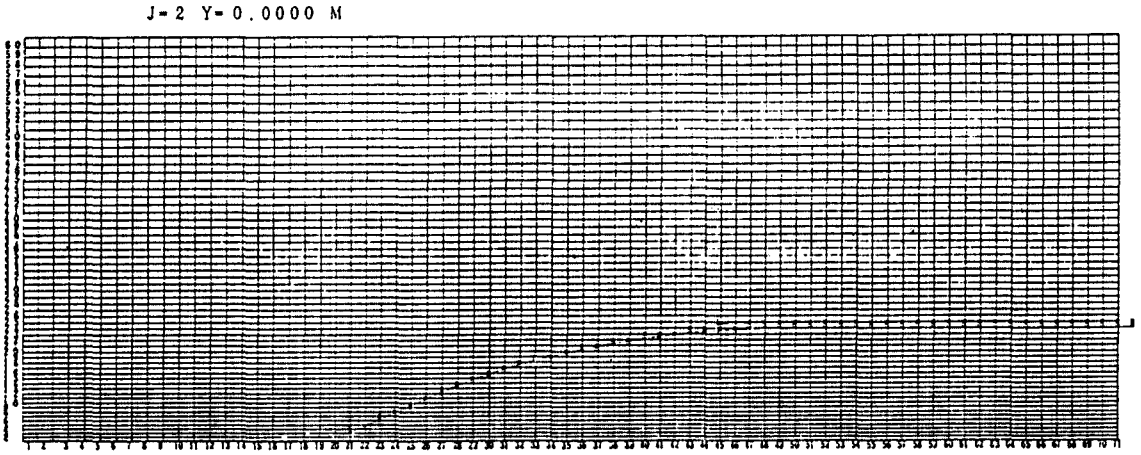


Fig. 17 Cell divisions of the forebody of MS416B

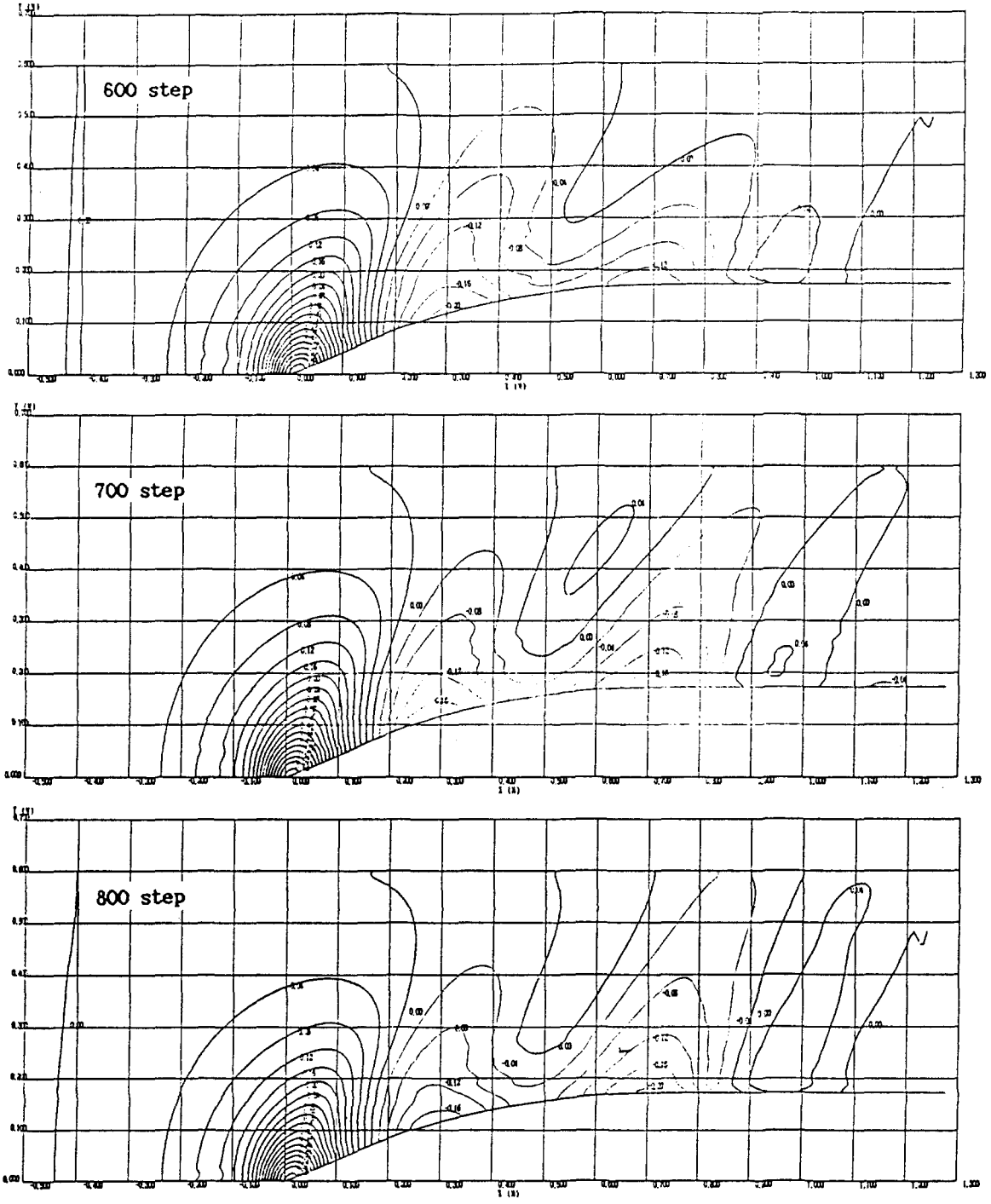


Fig. 18 Time evolution of wave contour map of the MS416B. The uniform stream velocity is accelerated up to the 600th time step

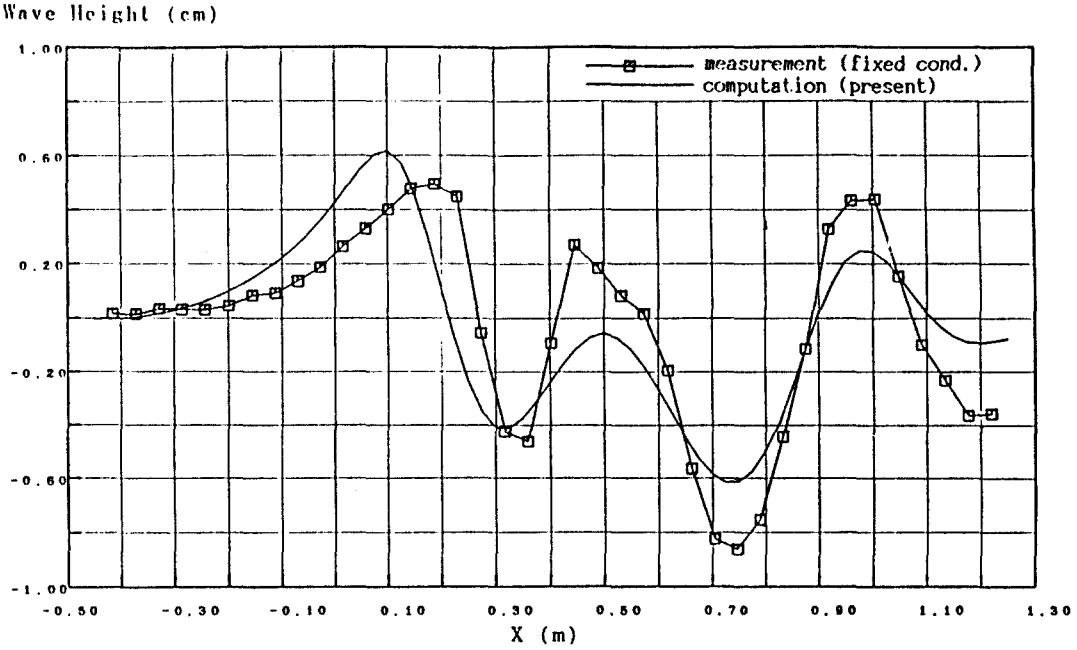


Fig. 19 Comparison of wave profiles of the forebody of MS416B at the straight-line that is 0.22m away form center-line

6. 결 론

(1) 자유표면과 물체경계에서의 계산정도 향상을 위해 variable mesh를 사용한 유한차분법에 의하여 임의 형상선체의 조파현상을 시뮬레이션한 결과, 일정한 간격의 mesh를 사용한 경우보다 variable mesh를 사용한 경우가 정성적, 정량적인 면에서 더욱 향상된 결과를 보였다.

(2) 비록 계산된 결과가 실험값들과 정량적으로 잘 일치하지는 않지만, cell의 숫자를 증가시킨다면 어느 정도까지는 결과가 더 향상되리라 생각된다.

(3) 개발된 전산 프로그램은 여러 형상을 가지는 배의 선수파를 수치적으로 시뮬레이션할 수 있으므로, 선형의 초기설계시 조파성능이 우수한 선형설계에 응용할 수 있다고 본다.

(4) 앞으로 물체 경계조건을 개선하고 점성과 난류의 영향등을 고려한다면 조파저항 추정 정도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

후 기

본 논문의 계산을 수행함에 있어 물심양면으로 도움을 주신 해사기술연구소 선형추진실의 김은찬 실장과 직원들께 감사드리며, 특히 강국진 선임연구원께 감사드립니다. 그리고, 실험과 원고정리에 큰 도움을 준 김대현씨와 김윤영씨에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Gadd, G.E., "A method of computing the flow and surface wave pattern around full forms", *Trans. R. Inst. Naval Arch.* 118, pp.207-219, 1976.

[2] Roache, P.J., "Computational Fluid Dynamics, Hermosa, Albuquerque", *N.M.*, 1976.

[3] Chan, R.K.C. and Street, R.L. "A computer study of finite amplitude water waves", *J. comput. Phys.* 6, pp.68-94, 1970.

[4] Viecelli, J.A., "A computing method for incompressible flows bounded by moving walls", *J. Comput. Phys.* 8, 119, 1971.

[5] Nichols, B.D. and Hirt, C.W., "Improved free surface boundary conditions for numerical incompressible flow calculations", *J. comput. Phys.*8, pp.434-448,1971.

[6] Miyata, H. and Nishimuera, S., "Finite difference simulation of nonlinear ship waves", *J.F. Mech. Britain 157, pp.327-357, 1985.*

[7] Miyata, H. and Nishimuera S., "Finite difference simulation of nonlinear waves generated by ships of arbitrary three-dimensional configuration", us *Phys.* 60, No.3, 1985.

[8] *Lee Y.-G. and Miyata, H. and Kajitani, H., "Some applications of the TUMMAC method to 3d water wave problems", J. Soc. Naval. Arch. Korea.* 25, 1988.

[9] Hirt, C.W. and Nichols, B.D., "Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries", *J. Comp. Phys.*39, pp.201-225, 1981.

[10] Welch, J.E, Harlow, F.H., Shannon J.P., and Daly B.J., "The MAC Method, Los Alamso Scientific Lab.", Report LA-3425, Los Alamos, N.M., 1966.

[11] Miyata, H., Suzuki, A., and Kajitani, H., "Proceedings 3rd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics", 37, 1981.

[12] Hirt, C.W. Nichols, B.D., and Romero, N. C., "SOLA－A Numerical solution algorithm for transient fluid flows", *Los Alamos Scientific Lab.* Reprot LA-5852, Los Alamos, N.M., 1975.

[13] Dagan, G. and Tulin, M.P., "Two-dimensional free-surface gravity flow past blunt bodies", *J. Fluid Mech.* 51, pp.529-543, 1972.

[14] Dawson, C.W., "Calculations with the XYZ free surface program for five ship models." *Proc.* Workshop Ship Wave Resistance Computation , DTNSRDC, pp. 232-255, 1979.

[15] Lin, W.M., Newman, J.N. and Yue, D.K., "Nonlinear forced motions of floating bodies", *15th Symp. Nav. Hydrodynamics.* Hamburg, 1984.

[16] Ogiwara S., "Numerical calculation of free surface flow by means of modified Rankine source method", *Proc. 2nd Workshop Ship Wave Resistance Computation,* DTNSRDC, 1983.

[17] 홍성완, 조규종, 윤도수, 김은찬, 정우철, "통계해석에 의한 저항추정 및 선형개량", 대한조선학회지 제25권 4호, 1988.

[18] 이영길, 현범수, "Series 60(C_b = 0.6)선형의 저항, 파형, 선미 후류 반류의 계측 및 해석", 한국선박연구소 연구보고서, UDC 629-11, 1982.