
 論 文

大韓造船學會論文集
 第29卷第4號 1992年 11月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No.4, November 1992

유한차분법을 이용한 컨테이너선의 선수선형 개량

신수철*, 정우철*, 이영길**, 강국진**

Bow-Hull Form Development of a Container Ship by Using Finite Difference Method

by

S.C. Shin*, U.C. Jeong*, Y.-G. Lee** and K.J. Kang**

요 약

본 논문에서는 유한차분법을 이용하여 선수파형을 계산하고, 이 결과를 비교평가 하므로써 선수선형 개량에 활용할 수 있는 한 방법에 대하여 기술하였다.

여기에서 사용된 대상선박은 당사에서 개발완료한 4,400TEU급 고속 컨테이너선으로 기본선형과 선수수정 선형에 대한 수치계산과 모형시험이 각각 수행되었으며, 본 차분방법 의한 계산 결과를 Simplified N-K problem과 Rankine source method, 그리고 모형시험 결과와 각각 비교하였다.

이 결과 유한차분법에 의한 계산결과는 모형시험 결과와 매우 근사한 경향을 보였고, 따라서 선박초기 설계단계에서 최적선수선형, 특히 최적 벌브형상을 결정하는데에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

The finite difference simulation method for ship waves is introduced for hull form improvement. Numerical simulations were performed for a series of modified hull forms and the simulated results were used for the determination of the better hull forms.

A 4,400 TEU container carrier which was designed and experimented in towing tank was chosen for the purpose.

The calculation results are compared with those of model test, of simplified Neumann-Kelvin problems and of Rankine source method.

발 표: 1992년도 대한조선학회 춘계연구발표회('92. 4. 18.)

접수일자: 1992년 5월 18일, 재접수일자: 1992년 8월 12일

* 정회원, 삼성중공업(주)

** 정회원, 해사기술연구소

In this study, it is shown that the combination of the computer simulation by our method with the experiment provides one of the most economical and reliable procedures of hull form improvement and that the degree of accuracy of this method is so high that it can cope with very practical design purposes.

1. 서 론

항주중인 배는 자유표면을 교란하므로써 파를 발생시키고, 또한 발생된 파가 전파해 나가는 데에는 중력장(gravitational field)의 존재가 전제조건이 되어야 하며, 배가 일정한 속도가 계속 항진하기 위해서는 유체에 에너지가 지속적으로 공급되어야 한다.

이와같이 파를 발생시키기 위하여 유체에 가해진 힘을 조파저항이라고 한다. 다시 말해서 조파저항은 자유표면상이나 그 아래에서 운동하는 물체가 자유표면 주위의 유체입자를 교란시키므로써 평형을 파괴하고, 중력장의 영향에 의하여 동요하면서 물체로부터 무한원방으로 전파되어 나가는 파계를 발생시킬 때 소요되는 힘을 뜻한다. 이때 파계의 특성은 물체주위의 유동장, 즉 물체의 기하학적 형상과 운동 속도에 의하여 결정되어진다. 일반적으로 이러한 조파저항은 물체의 운동속도가 빠를수록 커지게 되며, 따라서 유조선이 산적화물선과 같은 저속선보다는 컨테이너선과 같이 비교적 빠른 선박에 있어서의 조파문제가 선형설계 관점에서 크게 부각되게 된다. 조파저항은 배의 형상을 약간 수정하므로써 상당히 감소시킬 수도 증가시킬 수도 있는데, 적절히 설계된 선수 벌브(bulb)는 그러한 하나의 예이기도 하다.

한편, 이러한 조파문제는 오늘날까지 주로 포텐셜(potential) 이론의 경계치 문제로서 다루어져 왔다. 그 중에서도 자유표면 조건을 근사적으로 선형화하고 이것을 만족시키는 속도장함수, 즉 선형 Green 함수를 구하는 선형이론(linearized theory)이 널리 이용되어 왔으며, 조파이론의 다수가 이 선형이론에 기초를 두고 있다.

그러나 근래에 이르러 선형이 점점 광폭 비대해져감에 따라 종래의 선형이론으로는 설명할 수 없는 현상이 나타나게 되었고 이 문제의 해결을 위하여 저속조파이론, Rankine 쏘오스법 등이 개발되었다.

그러나 이러한 개량된 비선형이론에 의해서 어느 정도의 개선된 결과를 얻을 수 있었으나 실제 실험 결과와의 적지않은 차이는 여전히 남게 되었다.

따라서 Laplace 방정식이 아닌 Euler 혹은 Navier-Stokes 방정식을 사용하는 해법이 등장하였다.

이러한 수치해석 기법은 전산기의 발달과 더불어 거의 모든 유체역학 분야에 적용되고 있으며, 그중 특히 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용한 비선형 자유표면 해석기법은 초기에 미국 Los Alamos 연구소에서 개발한 MAC(Marker-And-Cell) 기법[1]을 필두로 그것의 자유표면 경계조건과 물체 경계 조건을 각각 수정한 SUMMAC(Stananford University Modified MAC) [2], ABMAC(Abitrary Boundary MAC) [3], 그리고 자유표면 추적기법을 보다 간편하게 개량한 SOLA-VOF [4] 등으로 개량 발전되어 왔으나, 이 방법들은 2차원 유한수심에서의 자유표면해석 정도에 머무르고 있다.

그후에 일본에서는 이러한 MAC 기법들을 대폭 수정/개량하여 3차원 선체의 자유표면 근처에서의 비선형과 문제를 해석하고 그 결과를 선형개발에 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다[5] [6].

한편, 국내에서도 이러한 연구가 최근들어 활발히 수행중인 관계로 머지않아 선형개발 단계에서 보다 널리 활용될 수 있으리라 기대된다[7].

2. 지배방정식

본 연구에서는 유체를 비압축성 비점성유동이라고 가정하여 보존형의 운동량 방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 사용하였다[5]. 좌표계는 Fig.1과 같다.

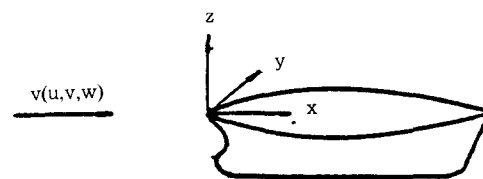


Fig.1 Coordinate system

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} &= -\frac{\partial \psi}{\partial z} - g \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $\psi = P/\rho$
 P: 압력
 ρ : 밀도

3. 계산방법과 경계조건

3.1 유한차분 방법

제(2)식은 좌변의 대류항 때문에 비선형 편미분 방정식이다.

본 연구에서는 한정된 격자계에서 이러한 비선형 방정식을 유한차분법으로 풀기 위하여 대류항에 대해서는 2차 중심차분과 상류차분이 결합된 혼합기법(hybrid scheme)을 이용하였고 그 나머지 항들에 대해서는 FTCS(Foward Time & Central Spacing) 차분기법을 이용하였다. 그리고 격자계는 Staggered 2-direction 가변 격자계(x방향은 constant, y방향과 z방향은 variable mesh)를 이용하였다.

지배방정식에 대한 차분표현과 계산 과정은 참고 문헌 [5] 등에 자세히 기술되어 있다.

한편, 혼합기법으로 대류항을 차분화할 경우에 중심차분과 상류차분중 어느쪽에 더 큰 가중치를 두느냐에 따라 수치해의 기동이 달라지게 된다.

이 조합계수(α)를 0에 가깝게 사용했을 경우에는 중심차분에 가깝게 되고 해의 정확도는 높아지게 되나 안정성이 결여되고 1에 가깝게 했을 경우에는 상류차분에 가깝게 되며 해의 안정성은 높아지나 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 선형의 특성과 수치 안정성 조건을 고려하여 적절한 α 를 사용하는 것이 수치해의 정확도와 안정성을 고려해 주는데 있어서 중요하다고 할 수 있다[8].

3.2 물체 경계 CELL의 설정 및 물체 경계조건

편미분 방정식의 수치적 해와 관계된 모든 분야에 서는 경계조건의 정확한 표현이 필요하다.

대부분의 편미분계에 있어서 경계조건들은 해의 특성에 지배적인 영향을 끼치고, 따라서 경계와 일치

하지 않는 격자점들의 사용은 차분화에 따르는 오차의 가장 주요한 요인이 된다. 그러므로 모든 경계들이 일치하는 좌표축들을 가지는 곡선좌표계(혹은 물체 적합 좌표계)는 편미분계의 일반적인 수치해에 필수적이고, 최근의 점성유동 해석과 관련된 많은 연구들이 이러한 곡선 좌표계를 이용하고 있다. 그러나 3차원 곡면과 매시간 단계마다 변화하는 자유표면을 함께 고려하는 곡선 좌표계를 구성하기에는 많은 어려움이 따르므로 본 연구에서는 계산의 편의상 직6면체(2차원인 경우는 4각형) 격자를 사용하여 물체 형상을 단순화시켜 자유 표면을 계산하는 방법을 택하였다.

본 연구에서, 선체는 (x,y) 평면에 수선과 (y,z) 평면에 늑골선으로 표현되는데 수선은 연속적인 선분으로 나타내고, 늑골선은 선체 표면을 포함하는 임의의 셀에서 수직방향으로의 변화가 무시된 직선들로 표현한다.

이렇게 되면 모든 셀들은 유체셀, 경계셀 그리고 빈셀로 나뉘어지게 되고 그중 특히, 경계셀에서의 물체경계조건은 다음과 같은 미끄러짐 조건이 된다.

- i) 물체표면에 수직방향 속도는 0(zero)이다.
- ii) 물체표면에 접한속도는 반성방향의 변화율을 갖지 않는다.
- iii) 발산도 자유조건을 만족해야 한다.

3.3 자유표면 및 기타 경계조건

자유표면에서 점성응력(viscous stress)과 표면 장력(surface tension)의 효과를 무시하면, 자유표면의 위치를 $z = \zeta$ 라 할 때 이 위치에서 동역학적 조건과 운동학적조건은 다음의 식 (3), (4)와 같다.

$$\psi = \psi_0 \tag{3}$$

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{\zeta}{\alpha t} + u \frac{\zeta}{\alpha x} + v \frac{\zeta}{\alpha y} - w \tag{4}$$

여기에서 $\psi_0 = P_0/\rho$
 P_0 : 대기압

식(3)의 경계조건과 불규칙성상(irregular star)을 사용하여 자유표면 근방에서의 압력을 계산하고, 식(4)에 의하여 표현된 kinematic condition은 자유표면에 놓여진 착색입자를 사용하여 만족되어진다.

착색입자는 Lagrangian manner로 움직이며 이것

들의 각 시간 단계에서의 새로운 위치는 다음의 (5)에 의하여 결정된다.

$$\begin{aligned} X_i^{n+1} &= X_i^n + DT \cdot u_i \\ Y_j^{n+1} &= Y_j^n + DT \cdot v_j \\ Z_k^{n+1} &= Z_k^n + DT \cdot w_k \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 (X_i^n, Y_j^n, Z_k^n) : n 시간 단계에서 착색입자의 위치

한편, 물체 경계를 제외한 계산영역에서의 경계조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Other Boundary Conditions

	Velocity	Pressure
Inflow Boundary Condition	D	N
Bottom Boundary Condition	N	D
Centerplane Boundary Condition	Symmetry	
side Boundary Condition	N	N
Outflow Boundary Condition	N	N

(D: Dirichlet condition, N: Neumann condition)

4. 수치계산 예

수치계산에 이용된 대상선박은 앞에서 언급한 바와 같이 당사에서 개발 완료한 4400 TEU 고속 컨테이너선으로, 1차선형을 HULL-I으로 그리고 이의 수정선형(선수 벌브를 중심으로 선수부만 국부 수정)을 HULL-II로 하여 주요제원을 Table 2에 나타내었다.

다음에 보이는 그림들은 본 대상선형의 벌브 형상과 설계속도(Fn=0.24)에서의 계산결과들이다.

Fig.3에서 보는바와 같이 선수파고의 최대높이가

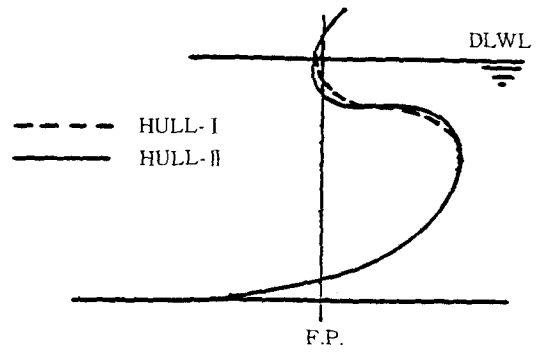


Fig.2 Bulbous bow configurations

Table 2 Principal Dimensions

	HULL-I	HULL-II
Lbp (M)	261.40	
B (M)	37.10	
T (M)	12.40	
Cb	0.590	
Lcb (M)	-5.042	-4.782

HULL-II에서 감소하고 그 뒤따라 발생하는 파저와 2차 파고의 절대 값이 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다.

뿐만아니라 Fig.4에서 보는바와 같이 파정이 전파되어 나가는 각도(선체 중심선에 대한 각도)도 HULL-II가 더욱 작아지는 경향을 나타내고 있다. 이로부터 HULL-II의 조파저항이 HULL-I의 그것보다 감소할 것으로 예측할 수 있고 이는 Fig.5의 모형시험 결과에서도 잘 나타나고 있다.

Fig.6~Fig.7은 본 차분방법에 의한 선측파고 형상과 Simplified Neumann kelvin problem, Rankine

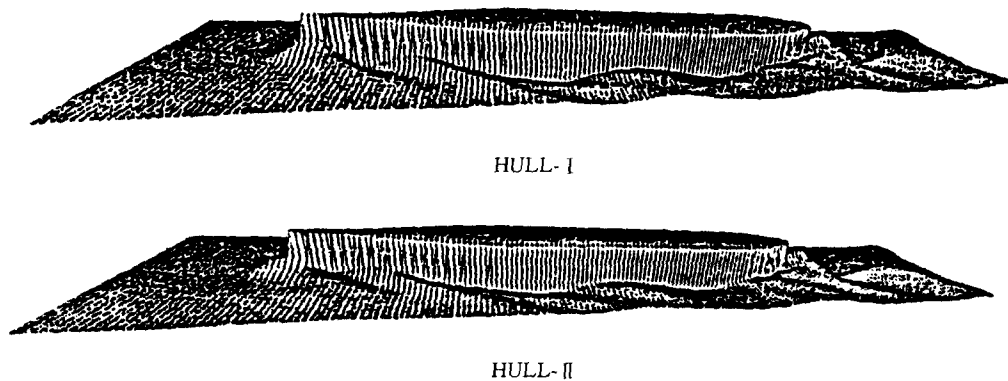


Fig.3 Perspective view of simulated wave

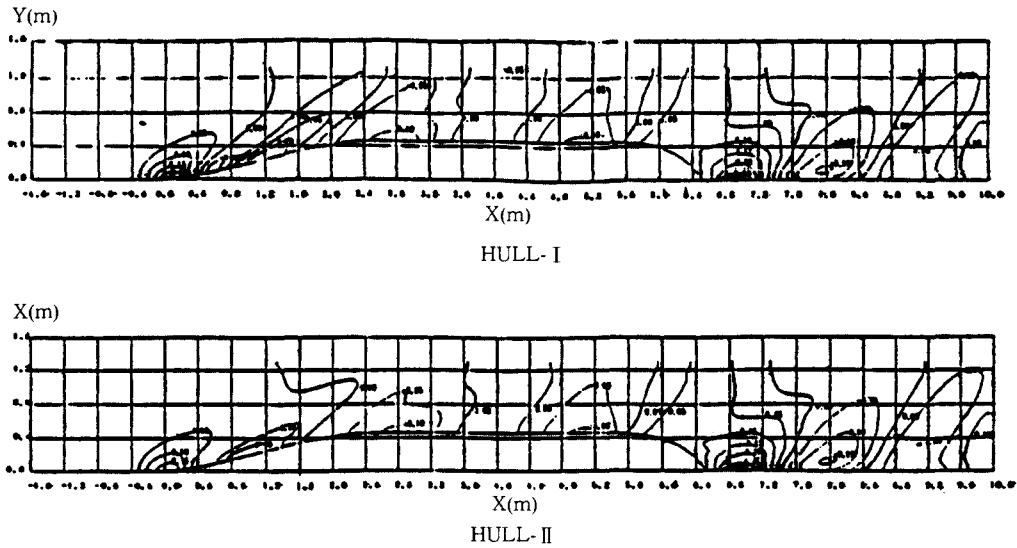


Fig.4 Wave height contour maps for 6.5M model

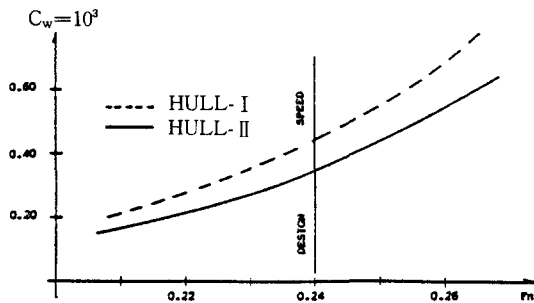


Fig.5 Wave resistance coefficient by model test

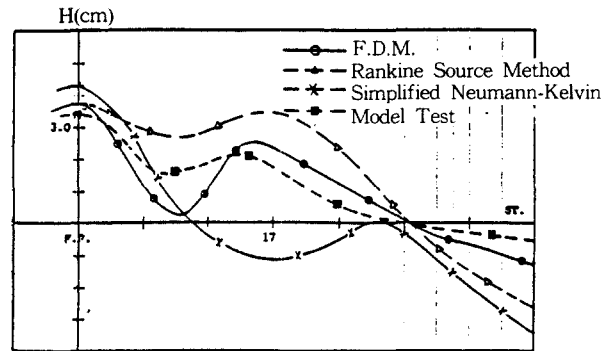


Fig.7 Computed and measured wave heights at hull side(6.5M Model, HULL-II)

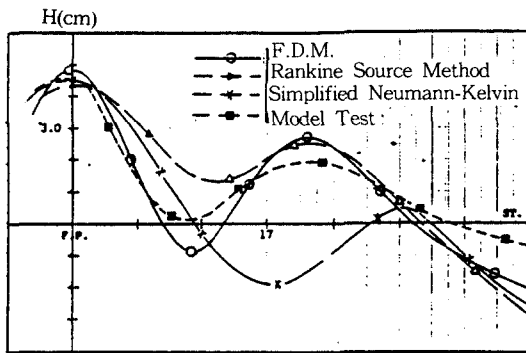


Fig.6 Computed and measured wave heights at hull side(6.5M Model, HULL-I)

Source Method에 의한 계산결과 그리고 모형시험 결과를 함께 비교하고 있다.

이로부터 본 방법에 의한 계산결과가 모형시험 결과와 가장 유사한 경향을 준다고 할 수 있지만 보다 정확한 계산을 위해서는 아직 개선의 여지가 있는 것으로 생각된다.

5. 결 론

유한차분법을 이용하여 당사 실적선인 고속 컨테이너선의 선수선형평가에 적용하여 보았다.

뿐만아니라, 이 계산 결과를 모형시험결과와 다른 수치해석결과와 함께 비교하였다.

이로부터 다음과 같은 몇가지 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유한차분법을 이용하여 파형을 계산하고 이를 선수선형설계에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.
- 2) 유한차분법에 의한 계산 결과는 다른 계산결과보다 모형시험결과에 더욱 근접됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 다양한 벌브 형상을 설계하여 적은 비용으로 빨리 최적형상을 찾을 수 있다는 점에서 초기설계 단계에서 그 활용도는 더욱 높아질 것으로 기대된다.
- 4) 앞으로 물체적합 좌표계를 이용하여 물체 경계조건을 개선하고 점성과 난류의 영향을 고려한다면 조파성능 추정정도를 더욱 향상시킬 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Welch J.E., Harlow F.H., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", *The Physics of Fluid*, Vol.8, No.12, December 1965.
- [2] Chan R.K.C., Street R.L., "SUMMAC-A Numerical Model for Water Waves", Stanford Univ. Technical Report No. 135, 1970.
- [3] Veccelli J.A., "A Method Including Arbitrary External Boundaries in a MAC Incompressible Fluid Computing Technique", *J. Computational Physics* 4, 1969.
- [4] Hirt C.W., et al., "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free-Boundaries", Los Alamos Scientific Lab. Report", 1975.
- [5] Miyata H., Nishimura S., "Finite Difference Simulation of Nonlinear Waves Generated by Ships of Arbitrary Three-Dimensional Configuration", *J. Computational Physics*, Vol.60, No. 3, Seq. 1985.
- [6] Nishimura S., Miyata H., "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, 1985.
- [7] Lee K.H., "A Numerical Simulation of Ship Waves by Finite Difference Method", INHA Univ 1991.
- [8] 이영길, "Euler-Equations에 의한 선체주위 파형 Simulation에 있어서 대류항의 차분 방법에 대한 고찰", KTTC저항 추진분과 공동 Workshop, 1991.