
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 3 號 1996 年 8 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 3, August 1996

판요소법을 이용한 선수형상 설계에 관한 연구(1)

유재훈*, 김효철**

A Study on the Design of Ship's Bow Form using Surface Panel Method

by

Jaehoon Yoo* and Hyochul Kim**

요 약

포텐셜을 기저로 하는 판요소법을 사용하여 자유 표면이 존재하는 유동장에서 일정 속도로 전진하는 3차원 물체의 형상을 설계하였다. 설계 방법으로는 원하는 압력 분포를 경계 조건으로 부여하고 이를 만족하는 물체 형상을 찾아내는 역해석법(inverse method)을 사용하였다. 즉, 주어진 압력으로부터 물체 표면에 분포된 법선 다이폴의 세기인 포텐셜 값을 결정하게 되며, 이는 물체 표면에 대한 Dirichlet 형태의 경계 조건으로서 Green의 정리로부터 유도된 적분 방정식을 해석하게 된다. 전체 속도 포텐셜은 기본 유동인 선속에 대한 성분과 선체에 의하여 교란되는 성분으로 구성되어진다고 가정하였으며, 교란 포텐셜을 사용하여 선형화된 자유 표면 경계 조건을 적용하였다. 적분 방정식에 대한 수치 해석을 위해 물체 표면에 법선 다이폴과 Rankine 쌍소스를 분포하였으며, 자유 표면에는 Rankine 쌍소스를 분포하고 4점 유한 차분법을 사용하여 자유 표면 경계 조건이 만족되도록 하였다. 해로서 얻어지는 각 판요소에서의 Rankine 쌍소스의 세기는 가상의 유동 출입량으로서 형상 수정항으로 사용되었다. 물수 회전 타원체의 형상 설계에 대하여 본 설계법을 적용한 결과 무한 수심에서나 조파 상태에서 4~6회의 반복 계산으로 충분히 수렴된 해를 얻을 수 있었다. 또한 자유 표면을 가르고 전진하는 Wigley 수학적 선형에 대한 형상 설계를 수행하여 만족스러운 결과를 얻어 내었으며, 얻어진 수치해는 매우 안정적이고 빠른 수렴성을 보였다. 선형의 우열 비교를 통해 조파 저항을 감소시킬 수 있는 압력 분포의 형태를 파악하였으며, 이를 바탕으로 조파 저항의 관점에서의 5500TEU급 컨테이너 운반선의 설계를 수행하였다. 설계되어진 새로운 선형은 조파 저항의 관점에서 기존의 선형보다 계산과 실험에서 모두 우수하게 개량된 것으로 나타났다.

발 표: 1996년도 대한조선학회 춘계연구발표회 ('96. 4. 18)

접수일자: 1996년 5월 6일. 재접수일자: 1996년 6월 21일

* 정회원, 삼성중공업 중앙연구소

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

Abstract

A surface panel method treating a boundary-value problem of the Dirichlet type is presented to design a three dimensional body with free surface corresponding to a prescribed pressure distribution. An integral equation is derived from Green's theorem, giving a relation between total potential of known strength and the unknown local flux. Upon discretization, a system of linear simultaneous equations is formed including free surface boundary condition and is solved for an assumed geometry. The pseudo local flux, present due to the incorrect positioning of the assumed geometry, plays a role of the geometry corrector, with which the new geometry is computed for the next iteration. Sample designs for submerged spheroids and Wigley hull are carried out to demonstrate the stable convergence, the effectiveness and the robustness of the method. For the calculation of the wave resistance, normal dipoles and Rankine sources are distributed on the body surface and Rankine sources on the free surface. The free surface boundary condition is linearized with respect to the oncoming flow. Four-points upwind finite difference scheme is used to compute the free surface boundary condition. A hyperboloidal panel is adopted to represent the hull surface, which can compensate the defects of the low-order panel method. The design of a 5500TEU container carrier is performed with respect to reduction of the wave resistance. To reduce the wave resistance, calculated pressure on the hull surface is modified to have the lower fluctuation, and is applied as a Dirichlet type dynamic boundary condition on the hull surface. The designed hull form is verified to have the lower wave resistance than the initial one not only by computation but by experiment.

1. 서 론

본 연구는 설계 도구의 하나로서 조파저항 관점에서 선형 설계 기법을 개발하는 데에 그 목적을 두었다. 설계 방법으로는 물체의 표면에 설계자가 희망하는 압력을 분포시키고 이에 대응하는 물체 형상을 찾아내는 방법을 사용하였다. 이 방법은 물체표면에 대한 동적 경계조건으로부터 그에 상응하는 물체 형상을 찾아내는 역해석법(inverse method)으로서 Lee등[2]에 의하여 날개면의 설계에 적용되어 만족스러운 결과를 얻은 바 있다. Lee등은 2차원 날개 형상에 대한 수치 계산의 안정적이고 신속한 수렴성을 확인하였으며, 아울러 3차원 형상에 대한 임의 설계법의 가능성을 보이기도 하였다. 본 연구에서는 Lee등이 사용한 방법을 본격적인 3차원 형상의 설계에 적용하였으며, 자유표면을 함께 고려하여 조파저항 관점에서의 형상 설계를 시도하였다. 이를 위하여 초기 형상에 대한 경계치 문제를 해석하여 물체표면의 압

력과 속도 분포를 계산한 뒤, 임의로 물체표면의 압력을 수정한 후 다시 물체표면에 대한 Dirichlet 형태의 경계조건으로 입력하여 초기 형상을 변형시키도록 하였다. 즉, 주어지는 압력은 물체표면에 분포된 법선 다이폴의 세기인 포텐셜 값을 결정하게 되고, 경계면의 위치 이동으로 운동학적 경계조건을 만족시키게 된다. 경계면의 위치는 적분방정식의 해로서 얻어진 각 판요소에서의 Rankine 쌍오스 세기, 즉 가상의 유동 출입량을 적분하여 얻은 형상 수정항을 사용하여 이동시키게되며, 구해진 새로운 형상은 다음의 계산 단계에서 다시 같은 계산을 반복하게 된다. 이러한 반복 계산은 경계면에서의 유동 출입량이 일정한 한계를 만족할 때까지 계속되어 최종적인 형상의 설계를 유도하게 된다. 이러한 설계 문제의 풀이를 위하여 Green정리로부터 적분 방정식을 유도하였으며 포텐셜 기저 판요소법을 적용하였다. 형상 수정항에 의한 형태 변화는 반복 기법에 의해서 각 판요소에서의 유동 출입량이 0으로 수렴할 때까지 계속

하도록 하였다.

이러한 설계법 및 수치 해법의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 자유표면의 영향이 없는 무한 수심에서 일정 속도로 전진하는 3차원 구에 대해서 같은 조건의 회전 타원체에 대해 계산된 표면 압력을 분포하여 구 형상이 타원체 형상으로 변화되도록 하였으며, 그 변화되는 과정을 추적하여 수치해의 수렴성을 조사하였다. 또한 자유표면 가까이에서 조파 상태로 전진하는 경우에 대해서도 마찬가지로 방법을 사용하여 구 형상의 변형 및 회전 타원체 형상의 변형에 대한 해의 수렴성을 조사하였다. 또한 자유표면을 가르고 진행되는 경우의 하나로 Wigley 수학적 선형에 대하여 임의의 형상을 변형시킨 후 원래 선형의 표면 압력을 조건으로 적용하여 원래의 선형으로 변형되는가를 살펴보았다.

본격적으로 5500TEU급의 컨테이너 운반선에 대한 초기 선형에 대해 계산되어진 압력 분포를 설계자가 원하는 압력 분포로 수정한 뒤, 이를 초기 선형의 표면에 적용하여 선형의 개량이 수행되도록 하였다. 설계되어진 새로운 선형은 회류 수조에서의 저항 시험을 통하여 조파저항의 개선 여부를 조사하였다. 수정된 선형은 설계 속도인 $Fn=0.25$ 에서 계산과 실험에서 공통적으로 조파저항의 감소를 보였으며, 이를 통하여 본 설계 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

2. 문제의 정식화

일정 속도 U_∞ 로 진행하는 선체 주위의 정상 유동 해석을 위해 좌표계는 Fig.1과 같이 선체의

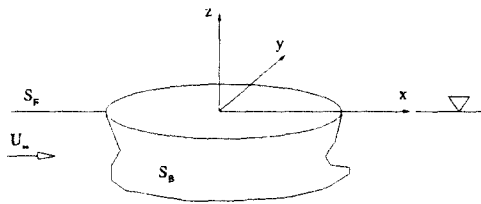


Fig.1 Coordinates System and Definition Sketch of a Wave Generating Body

중앙부를 원점으로 흐름의 하류 방향으로 $+x$ 축, 연직 상방향으로 $+z$ 축이 되는 오른손 좌표계를 택하였다. 유체를 비점성, 비압축성 및 비회전성으로 가정하면 다음과 같은 전속도포텐셜 (total velocity potential) Φ 로써 기술할 수 있다.

$$\Phi = \phi_\infty + \phi = \vec{U}_\infty \cdot \vec{x} + \phi \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 물체에 의해 교란된 성분을 표시하는 교란 속도포텐셜이며, 문제의 해석에는 이 교란포텐셜을 사용하였다. 교란포텐셜의 해를 구하기 위한 지배 방정식으로 유체장 내에서 질량 보존을 의미하는 Laplace 방정식을 도입한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

지배 방정식 (2)는 물체 및 물체를 둘러싼 모든 경계면에서 다음과 같은 경계조건을 부과함으로써 유일 해를 갖게 된다.

- (i) 물체표면 S_B 에서의 운동학적 경계조건;

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{U}_\infty \cdot \vec{n} \quad \text{on } S_B \quad (3)$$

여기서, \vec{n} 은 경계면에서의 단위 법선 벡터로서 유체장을 향할 때 양의 값으로 정의한다.

- (ii) 선형화된 자유표면 경계조건;

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{U_\infty^2}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (4)$$

여기서 g 는 중력 가속도를 뜻한다.

- (iii) 해저면 S_{bottom} 에 대한 경계조건;

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_{bottom} \quad (5)$$

(iv) 무한 원방에서의 방사 조건;

$$\phi = \begin{cases} o\left(\frac{1}{r}\right), & x \rightarrow -\infty \\ O\left(\frac{1}{r}\right), & x \rightarrow \infty \end{cases} \quad (6)$$

(v) 설계 문제에서는 조파저항에 대한 단순 해석과는 달리 설계하고자 하는 형상면에 원하는 압력 분포를 입력하고, 이러한 조건을 만족시키는 새로운 형상을 구하는 문제이다. 따라서 설계면상에는 원하는 압력 분포가 되도록 하는 물체표면상의 동역학적 경계조건과 함께 설계면의 마감 조건이 부가되어진다.

$$p = p_{given} \quad \text{on the design surface} \quad (7)$$

$$\oint_{S_n} \frac{\partial}{\partial n} (\phi + \vec{U}_\infty \cdot \vec{x}) ds = 0 \quad (8)$$

여기서 설계면의 마감 조건은 설계면을 빠져나가는 총 유동 출입량(net flux)이 0 이라는 조건으로서 이 조건이 부과되어야 설계된 물체가 닫힌 형상이 된다.

경계면 S 및 특이점을 포함하는 S_ϵ 으로 정의되는 유체 영역에서 지배방정식 (2)를 만족하는 교란포텐셜은 Green의 정리에 의해 다음과 같은 적분식을 만족하게 된다.

$$\iint_{S+S_\epsilon} \left\{ \phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} dS = 0 \quad (9)$$

G는 Green 함수로서 Rankine 쏘오스를 사용한다.

$$G = -\frac{1}{4\pi r}, \quad r = |\vec{x} - \vec{\xi}| \quad (10)$$

여기서,

\vec{x} : 유동장 내 임의의 점의 위치 벡터

$\vec{\xi}$: 경계면상의 특이점의 위치 벡터

위의 식 (9)는 물체와 자유표면이 있는 경우에 대하여 다음과 같은 적분 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \phi + \frac{1}{4\pi} \int_{S_n} \phi \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r}\right) dS \\ & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_n} \frac{\partial \phi}{\partial n} \left(-\frac{1}{r}\right) dS \\ & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \left(-\frac{1}{r}\right) dS = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\sigma^B (= \partial \phi / \partial n)$ 와 $\mu^B (= -\phi)$ 는 물체표면에 분포된 Rankine 쏘오스와 법선 다이폴의 세기이고, σ^F 는 자유표면에 분포된 Rankine 쏘오스의 세기이다.

조파저항 해석시에는 물체표면의 형상이 주어지는 값으로서 식(3)에 의하여 물체표면에 분포된 Rankine 쏘오스의 세기가 결정되고 법선 다이폴의 세기만이 미지수가 된다. 그러나 설계 계산에서는 원하는 압력 분포가 주어지는 값이고 물체의 형상이 미지수인 문제가 된다. 즉, 주어지는 압력값이 물체표면상의 법선 다이폴의 세기를 결정하게 되고 Rankine 쏘오스의 세기 ($\partial \phi / \partial n$)가 미지수로서 계산의 해로서 구해지게 된다. 이러한 해의 유일성을 보장하기 위하여 아래와 같이 교란포텐셜을 물체표면상의 기준점 \vec{x}_0 에 대한 교란 포텐셜 ϕ_0 을 도입하여 다시 정의하고, 이에 의해 설계를 위한 적분 방정식을 새롭게 유도하였다.[3]

$$\phi = \phi_0 + \int_{S_n} \vec{V} \cdot d\vec{l} = \phi_0 + \phi' \quad (12)$$

이에 따라 식(11)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (\phi_o + \phi') \\
 & + \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} (\phi_o + \phi') \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \frac{\partial(\phi_o + \phi')}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_F} \frac{\partial(\phi_o + \phi')}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS = 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서 ϕ_o 는 상수로서, $\frac{\partial \phi_o}{\partial n} = 0$ 이므로,

$$\begin{aligned}
 & (\phi_o + \phi') \\
 & + \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} (\phi_o + \phi') \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \frac{\partial \phi'}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_F} \frac{\partial \phi'}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS = 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

또는,

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \phi_o + \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \phi_o \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \right\} \\
 & + \left\{ \phi' + \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \phi' \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \right\} \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \frac{\partial \phi'}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_F} \frac{\partial \phi'}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

$\sigma^B = \frac{\partial \phi}{\partial n}$, $\mu^B = -\phi$ 라 할 수 있으므로,

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \phi_o + \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \phi_o \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \right\} \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \frac{\partial \phi'}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & - \frac{1}{4\pi} \int_{S_F} \sigma^F \left(-\frac{1}{r} \right) dS \\
 & = \left\{ \mu^B + \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \mu^B \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \right\}
 \end{aligned} \tag{16}$$

와 같이 설계용 적분 방정식이 유도되었다.

3. 수치 해법

유도된 적분 방정식은 주어진 경계치 문제의 해석을 위하여 선체 표면에 Rankine 쌍오스와 법선 다이폴을, 자유표면에 Rankine 쌍오스를 분포하게 되며, 각각의 판요소에서의 특이점 세기는 일정한 것으로 가정한다.

$$\begin{aligned}
 \mu(\vec{\xi}) &= \mu_j \text{ on } j's \text{ panel, } j=1 \sim N_B \\
 \sigma(\vec{\xi}) &= \sigma_j \text{ on } j's \text{ panel, } j=1 \sim N_B \\
 \sigma(\vec{\xi}) &= \sigma_k \text{ on } k's \text{ panel, } k=1 \sim N_F
 \end{aligned} \tag{17}$$

수치 계산을 위한 적분 방정식(16)의 이산화식은 다음과 같이 기술된다. 이러한 적분 방정식의 계산은 각각의 흐름 방향의 판요소띠(panel strip)에 대해서 수행하였으며, 조파저항의 계산에서와 마찬가지로 특이점의 세기는 각 판요소에서 일정하다고 가정하는 저차 판요소를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m=1}^{M_B} \left\{ D_{ijnm}(\phi_o)_m - \sum_{n=1}^{N_B} S_{ijnm} \left(\frac{\partial \phi'}{\partial n} \right)_{nm} \right\} \\
 & - \sum_{m=1}^{M_F} \sum_{n=1}^{N_F} S_{ijnm} \sigma_{nm}^F \\
 & = \sum_{m=1}^{M_B} \sum_{n=1}^{N_B} D_{ijnm} \mu_{nm}^B
 \end{aligned} \tag{18}$$

여기서,

$$D_{ijnm} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi} \int_{S_{im}} \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS, i \neq n, j \neq m \\ 1 + \frac{1}{4\pi} \int_{S_{im}} \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r} \right) dS, i = n, j = m \end{cases} \tag{19}$$

$$S_{ijnm} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_{im}} \left(-\frac{1}{r} \right) dS \tag{20}$$

설계면의 마감 조건으로서 유량의 출입이 없다는 조건(8)을 적용하면 이산화식은 흐름 방향으로의 각 판요소띠(panel strip)에 대해서 다음과 같

이 된다.

$$\sum_{m=1}^{M_B} \sum_{n=1}^{N_B} \left\{ \left(\frac{\partial \phi'}{\partial n} \right)_{nm} l_{nm} \right\} \quad (21)$$

$$= - \sum_{m=1}^{M_B} \sum_{n=1}^{N_B} \left\{ (\vec{n}_{nm} \cdot \vec{U}_\infty) l_{nm} \right\}$$

원하는 압력 분포를 가지는 형상을 설계하기 위해서는 먼저 가상 또는 초기의 형상을 해석하여야 한다. 이후 계산된 압력 분포를 선체의 흐름 방향으로 분포된 각각의 판요소띠(panel strip)에 대해서 도시한 후, 이를 설계자가 원하는 압력값으로 수정하고 Dirichlet형식의 동적 경계조건으로 다시 입력하여 설계용 적분 방정식을 풀게 된다. 주어진 경계면에 대해 주어진 압력값으로부터 n 번째 판요소에서의 법선 다이폴의 세기를 구하면,

$$\mu_{nm}^B = \mu_o - \sum_{i=1}^n (V_C)_{im} l_{im} \quad (22)$$

와 같다. 여기서,

$$V_C = V \cos \alpha$$

$$V = (1 - C_p)^{\frac{1}{2}}$$

α : 해석에 의해 구해진 유동방향과 각 판요소의 길이 방향이 이루는 각

C_p : 경계조건으로 주어진 압력계수

l : 판요소의 길이방향으로의 표면 거리

μ_o : 기준점(각 판요소띠의 상류방향 첫 번째 판요소)에서의 다이폴 세기

일반적인 3차원 형상의 경우에는 실제 유동과 판요소의 길이 방향과는 각을 이루게 되고, 수치 계산에서는 판요소상에서의 접선 유동중 판요소의 길이 방향과 폭 방향으로의 값만을 얻게 되므로 계산된 유동속도에 대하여 실제 유동의 방향 α 를 구해내어야 한다. 이러한 유동의 방향은 판요소의 길이 방향에 대해서 직각을 이루는 유동을

계산하여야 찾아낼 수 있으므로 다음과 같이 길이 방향의 직각 방향으로의 유동 속도 \vec{V}_R 을 계산하였다. Fig.2 에서와 같이,

$$\vec{V}_S = \vec{V}_C \cos \theta + \vec{V}_R \sin \theta \text{ 이므로,}$$

$$\vec{V}_R = \frac{\frac{\partial}{\partial \eta} (\phi + \vec{U}_\infty \cdot \vec{x}) - \vec{V}_C \cos \theta}{\sin \theta} \quad (23)$$

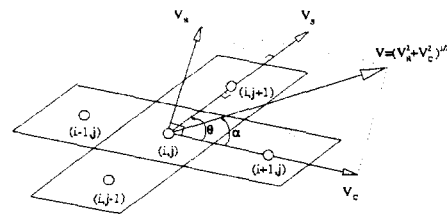


Fig.2 Directions of Flow on a Hull Surface Panel

가 되며, 여기서 η 는 폭방향 판요소로의 방향이며, η 와 길이 방향으로 놓여진 판요소로의 방향이 이루는 각을 θ 라 한다. 계산된 속도성분 \vec{V}_R 로 부터 다음의 식을 이용해 유동의 방향각을 계산해 내고 이로부터 유동의 판요소 길이 방향 성분을 추출하여 동적 경계조건 및 설계면 마감 조건에 사용하였다.

$$\cos \alpha = \frac{\vec{V}_C}{|\vec{V}|} = \frac{\vec{V}_C}{(V_C^2 + V_R^2)^{1/2}} \quad (24)$$

결국 식 (18)과 (21)에 의해 M_B 개의 미지수 ϕ_o 가 늘어난 방정식의 해를 $M_B \times (N_B + 1) + M_F \times (N_F - 3)$ 개의 식을 풀어 구할 수 있게 된다. 적분 방정식으로부터 첫번째 계산이 수행되면 그 해로서 각각의 판요소에서의 가상의 유동 출입량 $\left(\frac{\partial \phi}{\partial n} + \vec{U}_\infty \cdot \vec{n} \right)_i$ 및 기준점에서의 포텐셜 값 ϕ_o 를 얻게 된다.

첫번째 계산에서는 형상의 변형이 이루어지지 않은 초기 형상에 대한 계산이므로 원하는 압력값에 해당되는 형상과는 다른 것으로서 각 판요소에서의 유동 출입량은 0 이 아닌 값을 갖게 된다. 이러한 유동 출입량으로부터 다음 단계에서 사용할 각 판요소의 이동 변위, 즉 형상 수정항을 계산한다. n 번째 판요소에 대한 형상 수정항 T_n 은 아래와 같이 각 판요소때에 대한 가상의 유동 출입량(pseudo flux)의 합에 의해 계산된다.

$$T_n = \sum_{i=1}^{N_i} \left\{ \left(\frac{\partial \phi'}{\partial n} \right)_i + \vec{U}_\infty \cdot \vec{n}_i \right\} l_i \quad (25)$$

각 계산 단계에서는 각각의 판요소에서의 형상 수정항을 계산하고, 이를 단계마다 반복하여 주어진 압력값에 대응하는 최종적인 형상을 설계하게 된다. 얻어진 최종 형상에 대해서는 각 판요소의 유동 출입량 $\left(\frac{\partial \phi}{\partial n} + \vec{U}_\infty \cdot \vec{n} \right)$ 의 값이 모두 0 에 수렴하게 된다.

자유표면에서는 자유표면 경계조건 식(4)의 ϕ_{xx} 를 구하기 위하여 다음과 같은 4점 상류향 유한 차분(four-point upwind difference)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M_B} \sum_{n=1}^{N_B} \{ C^A_{ij} u_{ijnm}^{SB} \\ & + C^B_{ij} u_{i-1,jnm}^{SB} - C^C_{ij} u_{i-2,jnm}^{SB} + C^D_{ij} u_{i-3,jnm}^{SB} \} \sigma_{nm}^B \\ & + \sum_{m=1}^{M_F} \sum_{n=1}^{N_F} \{ C^A_{ij} u_{ijnm}^{SF} + C^B_{ij} u_{i-1,jnm}^{SF} \\ & + C^C_{ij} u_{i-2,jnm}^{SF} + C^D_{ij} u_{i-3,jnm}^{SF} \} \sigma_{nm}^F \quad (26) \\ & + \sum_{m=1}^{M_B} \sum_{n=1}^{N_B} \{ C^A_{ij} u_{ijnm}^{DB} + C^B_{ij} u_{i-1,jnm}^{DB} \\ & + C^C_{ij} u_{i-2,jnm}^{DB} + C^D_{ij} u_{i-3,jnm}^{DB} \} \mu_{nm}^B \\ & - \frac{\rho}{U_\infty^2} \frac{\sigma_{ij}^F}{2} = 0 \end{aligned}$$

여기서, (i, j) 번째 판요소의 조절점에 유기되는

속도 성분 u 는 각 경계면에 위치한 모든 특이점 (n, m) 에서 유기되므로, 자유표면과 선체 표면에 분포된 Rankine 소오스와 선체 표면에 분포된 법선 다이폴에 의해 유기된 속도 성분의 합으로 나타낼 수 있다. 또한,

u_{ijnm}^{SF} : (n, m) 번째 자유표면 판요소의 소오스에 의해 (i, j) 번째 자유표면상의 조절점에 유기되는 속도

u_{ijnm}^{SB} : (n, m) 번째 선체표면 판요소의 소오스에 의해 (i, j) 번째 자유표면상의 조절점에 유기되는 속도

u_{ijnm}^{DB} : (n, m) 번째 선체표면 판요소의 다이폴에 의해 (i, j) 번째 자유표면상의 조절점에 유기되는 속도

σ_{nm}^F : 자유표면위 (n, m) 번째 판요소에 분포된 소오스의 세기 $(= \partial \phi / \partial z = - \partial \phi / \partial n)$

σ_{nm}^B : 선체표면위 (n, m) 번째 판요소에 분포된 소오스의 세기

μ_{nm}^B : 선체표면위 (n, m) 번째 판요소에 분포된 다이폴의 세기

i : 조절점의 흐름방향 index

j : 조절점의 폭방향 index

n : 특이점의 흐름방향 index

m : 특이점의 폭방향 index

N_B : 물체표면상에 놓여진 판요소의 흐름방향으로의 개수

M_B : 물체표면상에 놓여진 판요소의 폭방향으로의 개수

N_F : 자유표면상에 놓여진 판요소의 흐름방향으로의 개수

M_F : 자유표면상에 놓여진 판요소의 폭방향으로의 개수

이다. 여기서, 모든 조절점들과 특이점들은 각각의 판요소의 도심에 위치하고 있으며, C^A_{ij} , C^B_{ij} , C^C_{ij} , C^D_{ij} 는 각 판요소의 분포 위치에 의해 결정되는 4점 유한 차분계수(operator)들이다.

$$\begin{aligned}
C_{ij}^A &= (h_{i,j} - h_{i-1,j})(h_{i-2,j} - h_{i,j})(h_{i-2,j} \\
&\quad \times (h_{i-1,j}^2 + h_{i,j}h_{i-1,j} + h_{i,j}^2)(h_{i-2,j} \\
&\quad + h_{i,j}) - h_{i-1,j}(h_{i-2,j}^2 + h_{i,j}h_{i-2,j} \\
&\quad + h_{i,j}^2) \times (h_{i-1,j} + h_{i,j}) \} / D_{ij} \\
C_{ij}^B &= h_{i-1,j}h_{i-2,j}(h_{i-1,j}^2(h_{i-2,j} - h_{i,j}) \\
&\quad - h_{i-2,j}^2(h_{i-1,j} - h_{i,j})) / D_{ij} \\
C_{ij}^C &= -h_{i,j}^3h_{i-2,j}(h_{i-2,j} - h_{i,j}) / D_{ij} \quad (27) \\
C_{ij}^D &= h_{i,j}^3h_{i-1,j}(h_{i-1,j} - h_{i,j}) / D_{ij} \\
D_{ij} &= \frac{1}{2} h_{i,j}^2h_{i-1,j}h_{i-2,j}(h_{i-1,j} - h_{i,j}) \\
&\quad (h_{i-2,j} - h_{i,j})(h_{i-1,j}(h_{i-2,j} + h_{i,j}) \\
&\quad - h_{i-2,j}(h_{i-1,j} + h_{i,j}))
\end{aligned}$$

여기서, $h_{ij} = x_{i,j} - x_{i-1,j}$, $h_{i-1,j} = x_{i,j} - x_{i-2,j}$, $h_{i-2,j} = x_{i,j} - x_{i-3,j}$ 는 조절점 사이의 흐름 방향 으로의 거리를 뜻한다.

자유표면 경계조건에 대한 자유표면의 가장 상류 위치에서의 유한 차분은 4점을 이용할 수 없으므로, 각 길이 방향 판요소띠에 대해서 처음 3번째 판요소까지는 쏘오스 세기($\sigma_{i=1\sim 3,j}^F$)를 0의 값으로 사용하였고, 차분 계산은 4번째 판요소부터 수행하였다. 이는 상류 방향에 대한 무한 원방 경계조건을 수치적으로 만족시켜 주는 조건이 된다. 하류 방향에 대한 방사 조건은 4점 상류향 유한 차분법의 사용에 의한 수치적인 오차에 의해 자동적으로 만족시킬 수 있다. [4]

유도된 적분 방정식의 수치 계산을 위해서는 먼저 적분 영역 S , 즉 선체 표면과 자유표면에 대한 요소 분할을 수행하여야 한다. 선체 표면의 판 요소는 비평면 쌍곡면 판요소[5]를, 자유표면상에는 평면 판요소를 분포하였으며, 선체 표면의 효율적인 판 분할을 위하여 cosine함수를 이용하여 선수, 선미 부근의 판요소 밀도를 높여 주어 적은 수의 판요소로도 조파 현상 및 조파저항값의 계산에 중요한 선수미 부근의 요소 정밀도를 향상시켰다.

각각의 판요소에서의 Rankine 쏘오스 및 법선 다이폴의 세기는 일정하다고 가정하는 저차 판요

소법을 사용하였으나, 쌍곡면 판요소법을 채택하여 저차의 평면 판요소법이 가지는 몇가지 단점을 제거하도록 하였다. 즉, 평면 판요소법을 사용하게 되면 선수나 선미와 같이 물체의 곡률이 급격하게 변하는 경우 매우 많은 수의 판요소를 사용하지 않는다면 판요소 사이의 틈새(leakage) 문제를 야기하거나 유동장점이 판요소에 아주 가까이 있을 경우에는 유기 속도포텐셜값이 부정확해지는 등의 문제가 발생하게 된다. 쌍곡면 판요소법은 각 판요소에 균일 밀도로 분포되어 있는 법선 다이폴에 의해 유기되는 포텐셜을 근사화하지 않고 정확하게 계산하여 주는 방법으로서, 각 판요소에 대해서 자기 자신에 의해 유기되는 포텐셜 값이 $\pm 1/2$ 이 아니고 $\pm 1/2$ 근처의 값이라는 특징이 있다. 또한 판요소 자체의 비평면성을 유지하여 주기 때문에 이웃하는 판요소 사이의 틈새 문제를 해결할 수 있다는 잇점이 있다. 이러한 쌍곡면 판요소의 사용은 비교적 적은 수의 판요소로도 수치해의 수렴성이 좋아지는 것으로 알려져 있다. [5]

4. 형상의 설계

자유표면의 영향이 없는 무한 수심에서 일정 속도로 전진하는 물수 회전 타원체에 대해서 형상 설계를 수행하였다. 먼저 장축대 단축의 비(b/a)가 2.0인 물수 타원체를 선택하여 무한 수심에서 $Fn=0.5$ 로 전진하는 경우에 대한 해석을 통해 표면 압력 분포를 구한 뒤 이를 같은 조건의 물수 구 표면에 분포하여 구 형상이 주어진 압력에 대응되는 형상으로 변화되도록 하였다. 계산에는 20×10 개의 판요소를 사용하였으며, 형상의 변화에는 특별한 제한 조건을 가하지는 않았으나 급격한 형상의 변화가 수치 해석에 발산을 일으킬 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 완화계수(relaxation factor)를 도입하여 계산을 계속하도록 하였다. 즉, 새로운 압력에 의해 변화되는 조절점의 법선 방향 위치 변화가 형상 수정항 T_n 의 75%의 값이 되도록 하였다. Fig.3 에는 이러한 형상의 변화가 수행되는 과정을 폭의 변화에 대해 도시하였으며, 4회의 반복 계산에 의해 장축대 단축의 비(b/a)가

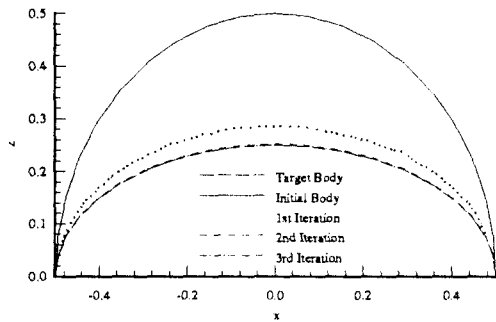


Fig.3 Convergence History of a Spheroid Design from Sphere (unbounded, $F_n=0.5$)

2.0인 물수 회전 타원체의 형상으로 완전히 수렴된 구를 살펴볼 수 있다. 또한 Fig.4에는 각 계산 단계에서 형상의 변화에 따른 물체표면에서의 가상의 유동출입량의 변화를 보였으며, 형상이 수렴되어 감에 따라 0의 값에 수렴되어 가고 있음을 살펴볼 수 있다.

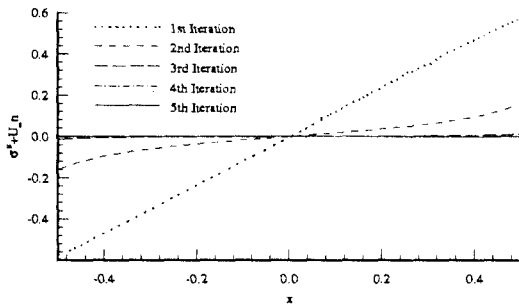


Fig.4 Convergence History of Pseudo Local Flux on Design Sphere (unbounded, $F_n=0.5$)

자유표면 가까이에서 전진하는 경우에 대해서도 마찬가지로 방법으로 형상 설계를 수행하였다. 설계에 사용된 물수체는 무한 수심 상태에 대한 수렴성 조사 때와 마찬가지로 장축대 단축의 비(b/a)가 2.0인 회전 타원체를 사용하였으며, 물수비 $z/b=1.0$ 인 상태에서 $F_n=0.5$ 로 전진하는 경우에 대해서 계산을 수행하였다. Fig.5에는 이러한 형상의 변화가 수행되는 과정을 도시하였으며, 6번의 반

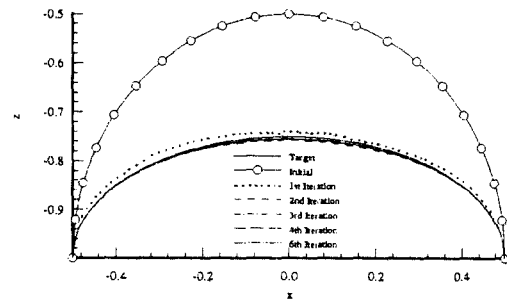


Fig.5 Convergence History of a Spheroid Design from Sphere ($z/b=1.0$, $F_n=0.5$)

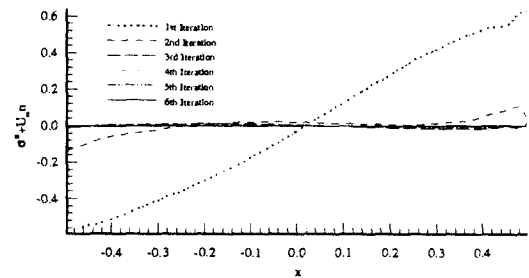


Fig.6 Convergence History of Pseudo Local Flux on Design Spheroid ($z/b=1.0$, $F_n=0.5$, 1st strip)

복 계산에 의해 구의 형상으로 수렴된 회전 타원체를 살펴볼 수 있다. Fig.6에는 변형되어 가는 물수체의 표면에서의 가상의 유동출입량의 변화를 도시하였다. 유동출입량의 값에도 파계의 영향이 미치고 있음을 살펴볼 수 있으며, 유동 출입량의 수렴과 함께 형상의 수렴이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

선박이 자유표면을 가르고 진행하는 경우에 대한 계산으로서 Wigley선형에 대한 설계를 수행하였다. 원래의 Wigley선형과는 달리 선형의 폭을 1.5배로 확대한 임의의 선형을 초기 선형으로 선택하고 원래의 Wigley선형에 대한 표면 압력을 적용하여 보았다. 선형의 변화에 특별한 제한 조건을 부과하지 않은 상태에서 설계 반복 계산을 수행하였으며 Fig.7에서 살펴볼 수 있듯이 10회의 반복 계산에 이르러 원래의 Wigley선형으로 수렴된 형상을 얻을 수 있었다.

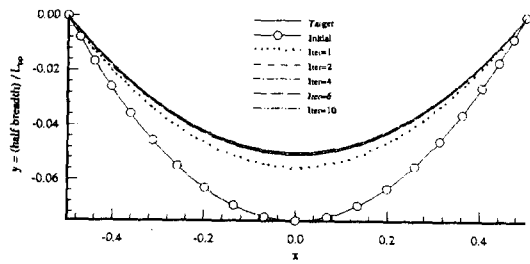


Fig.7 Convergence History of Waterline for Wigley Hull Design (1st strip, $F_n=0.2$)

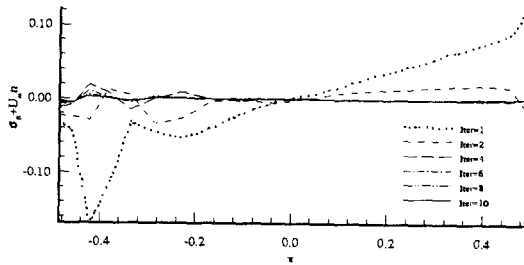


Fig.8 Convergence History of Pseudo Local Flux on Wigley Hull (1st strip, $F_n=0.2$)

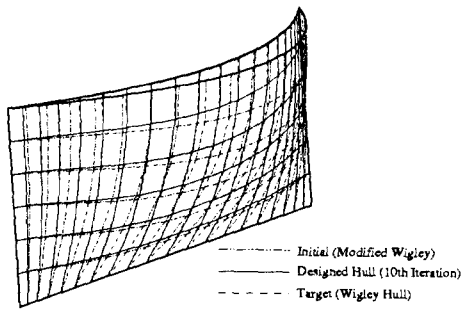


Fig.9 Initial and Designed Hull Form for Wigley Hull

반복 계산에 따른 선체 표면상에서의 유동출입량의 변화도 Fig.8에 보인 바와 같이 10회의 반복 계산에 따라 0으로 수렴되고 있음을 알 수 있다. 이 때 주어진 압력값에 의한 형상 수정량은 각각의 판요소의 흐름 방향 기울기에 따라 폭 방향 성분으로 분해되어 각 판요소의 폭방향 위치를 보정하도록 하였으며, 80%의 완화계수를 사용하였다. 초기 선형과 목표 선형, 그리고 10회의 반복 계산

을 통해 설계된 선형의 형상은 Fig.9에서 살펴볼 수 있으며, 만족할 만한 해의 수렴성을 갖고 있음을 알 수 있다.

이상의 고찰을 통하여 본 방법이 선형의 설계를 위한 방법으로서 타당함을 보였으며, 이를 바탕으로 본격적으로 5500TEU급의 컨테이너 운반선에 대한 설계 개량을 수행하였다. 먼저 조파저항을 감소시킬 수 있는 압력 분포의 경향을 파악하여 보았다.

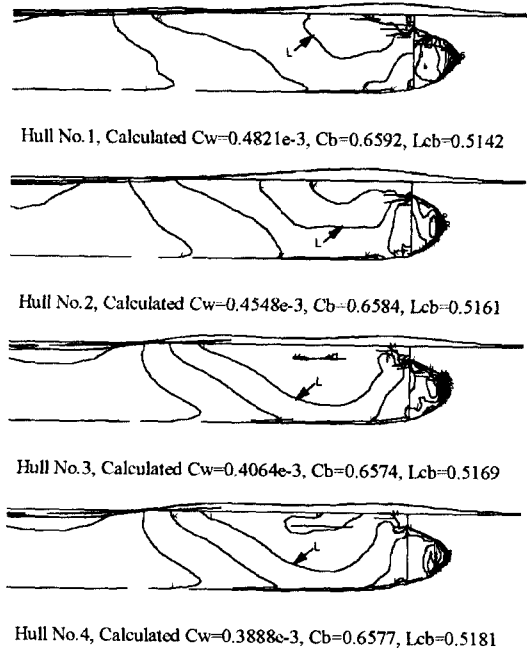


Fig.10 Pressure Distributions for 2300TEU Container Carriers ($F_n=0.23$, L contour's $C_p=0.15$)

Fig.10에는 실적선 중의 하나인 2300TEU급의 컨테이너 운반선에 대해 선형 변형 과정과 각각의 선형에 대한 조파 해석 결과를 선축 과정과 표면 압력 분포로 정리하였다. 그림을 살펴보면 선형의 변화에 따른 조파저항의 값이 작아질수록 선수파의 파고는 낮아지고 그에 따라 선수 부근에 지배적으로 분포되어 있는 L표시 등압곡선, 즉 압력 계수 C_p 가 0.15 되는 영역의 위치가 점점 넓어지

고 있음을 알 수 있다. 이는 조파저항이 작은 선형일수록 선체의 길이 방향으로의 압력 변화가 완만하게 이루어진다는 것을 의미하며, 이에 따라 발생하는 파계의 모습도 높고 급한 선수파보다는 낮고 평퍼짐한 형상의 선수파가 발생하게 된다는 것을 의미한다. 이러한 경향을 바탕으로 5500TEU 컨테이너 운반선의 선형설계를 수행하도록 하였다.

판요소의 분포는 선체 표면에 36×10 개의 요소를 선수부를 기준으로 밀도 변화를 가하여 생성하였다. 초기 선형은 자유표면이 존재하는 상태에서 자신의 설계 속도인 $Fn=0.25$ 에서의 유동 현상을 해석한 후 계산되어진 압력 분포를 각각의 판요소띠(panel strip)에 대해 도시하도록 하였다. Fig.11에는 선수 부근의 자유표면에 가까운 순서대로 6개의 판요소띠에 대해서 계산된 압력값의 흐름 방향 분포와 이에 대한 수정 목표값을 나타내었다. 설계되어질 선형에 대해 희망하는 압력값의 분포 경향은 지나친 압력값의 치우침이 제거되고 전반적인 압력의 변화율이 작아지도록 국부적인 수정을 하여 결정하였다. 수정된 압력값은 초기 선형의 표면에 동적 경계조건으로 적용되어 각 판요소의 폭방향 좌표점을 이동시켜 선형의 변형이 이루어지도록 하였다. 원하는 압력을 얻기 위한 형상

의 변화는 각 횡단면적의 변화가 심하게 변하여 애초의 설계 조건을 만족하지 않게 되는 것을 방지하기 위하여 각 판요소의 폭 방향 이동 변위를 초기 선형의 값에 대하여 5% 내에서만 이루어지도록 설계적인 관점에서의 한계를 부과하였다. 즉, 이동되는 설계점의 y 좌표값이 초기 선형의 값보다 5% 이상 커지거나 작아지게되면 더 이상의 형상 변화가 이루어지지 않도록 하였다. 또한 계산의 목적이 조파저항의 개선을 위한 선수부의 설계이므로 선체 중앙을 기준으로 선미부에 대해서는 모든 계산 단계에서 형상의 변화가 이루어지지 않도록 하였다. 각 계산 단계에서의 선형의 변화 추이를 자세히 추적하기 위하여 계산점의 이동 변위가 계산된 형상 수정량의 10%에서 수행되도록 작은 값의 완화 계수(relaxation factor)를 부여하였다. 이러한 작은 값의 완화 계수는 조건으로 주어진 압력값이 설계자의 임의에 의해 결정된 비현실적인 경우에도 비교적 원활한 형상 변화를 얻을 수 있다는 장점을 갖게 된다. 주어진 제한조건에 의해 해가 발산하기 전인 30회의 반복 계산을 통해 선형의 변화되는 과정은 Fig.12에 보이는 바와 같으며, 각각의 반복 계산마다 계산되어진 각 판요소의 유동출입량의 변화는 Fig.13에 보였다.

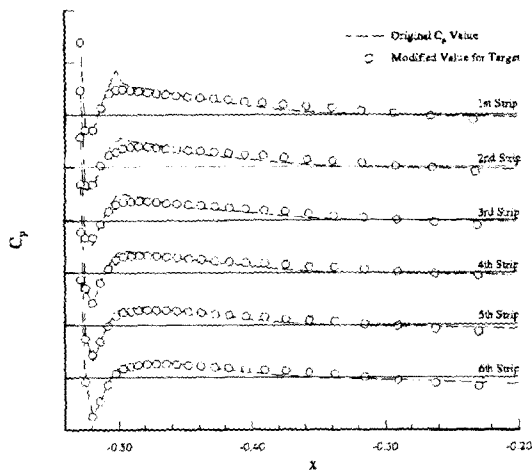


Fig.11 Pressure Variation along Longitudinal Panel Strip for 5500TEU Container Carrier

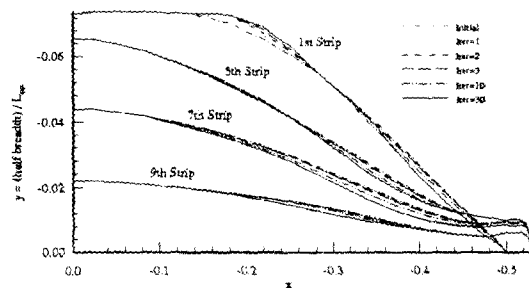


Fig.12 Convergence History of Waterlines for 5500TEU Container Carrier Design

Fig.14에는 30회의 반복 계산을 통해 얻어진 수정 형상과 함께 초기 선형을 도시하여 선형의 변화 정도를 살펴 볼 수 있도록 하였다. 그림을 살펴보면 전반적인 선형의 형태가 선수부의 수선면을 기준으로 약간 오목해 졌으며, 앞 어깨 부분이

약간 급한 기울기를 갖도록 변화된 것을 파악할 수 있다. Fig.15 에는 초기 선형과 수정 선형에 대한 조파해석을 재 수행하여 얻어진 각각의 표면

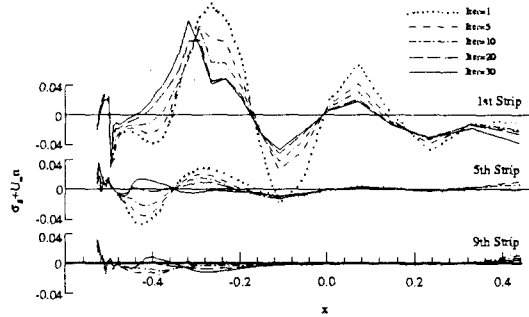


Fig.13 Convergence History of Pseudo Local Flux on 5500TEU Container Carrier

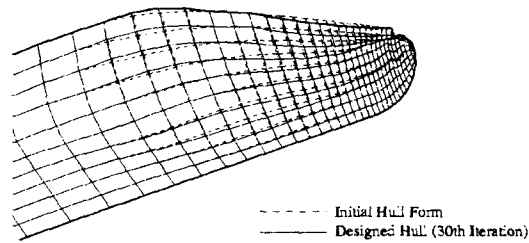


Fig.14 Initial and Designed Hull Form for 5500TEU Container Carrier

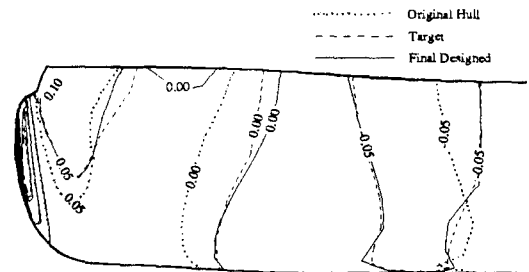


Fig.15 Pressure Distribution for Design Container Carriers

압력값의 분포 형태를 비교하였으며, 이를 통하여 애초의 설계 조건으로 부여했던 경계조건으로서의 압력 분포를 보이고 있는 지를 확인하였다. 본 방법에 의해 설계되어진 수정 선형의 표면 압력 분포는 애초의 설계자가 희망했던 것과 비교적 잘 일치하며, 이를 통하여 설계자가 요구하는 조파저

항의 감소를 위한 선형의 설계가 만족스럽게 이루어진 것으로 판단되어진다.

설계 관점에서의 제한조건으로 인하여 Rankine 쏘오스의 세기가 0으로 충분히 수렴하지는 않음을 알 수 있으며, 이러한 경향은 자유표면에 가까운 판요소띠에서 두드러짐을 살펴볼 수 있다. 이러한 현상은 설계자가 희망한 압력 분포의 값이 실제의 선형을 완성시키기에는 현실적인 엄밀성이 부족하기 때문인 것으로 판단되며, 특히 조파 현상에 의한 압력값의 변화가 고려되지 않은 이유에 기인한 것으로 생각된다. 이러한 압력값의 비현실적인 분포는 설계 관점의 제한 조건과 함께 어느 정도의 반복 계산 후에는 해를 발산시키는 원인으로 작용하게 되므로 본 계산에서는 Rankine 쏘오스의 세기가 더 이상 감소하지 않는 30회에서 계산을 멈추도록 하였다.

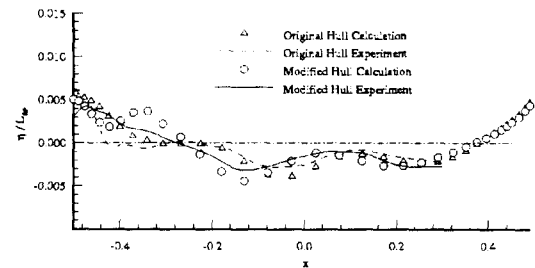


Fig.16 Wave Profiles for Design Container Carriers

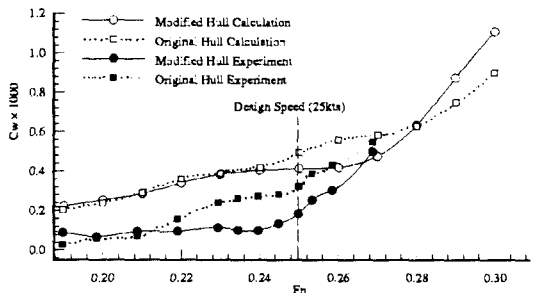


Fig.17 Wave Resistances for Design Container Carriers

수정 선형에 대한 조파저항에 대한 계산 결과는 초기 선형에 대한 계산 결과와 함께 회류 수조에

서의 저항 시험 결과에 대해서 비교하였으며, Fig.16의 선측 파형과 함께 Fig.17의 속도에 따른 조파저항값으로 정리하였다. 그림에서 살펴 볼 수 있는 바와 같이 수정된 선형은, 계산과 실험에서의 항주자세의 차이에 의하여 다소 정량적인 차이가 있기는 하나, 파계 분포에서나 선측 파형에 있어서 확연히 개선되어진 것을 볼 수 있다.

5. 결 언

이상의 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 3차원 형상에 대한 형상 설계의 계산은 무한 수심 상태 및 조파 상태에서의 몰수 회전 타원체 및 자유 표면을 가르며 전진하는 Wigley선형에 대한 경우에서 모두 해의 수렴성이 안정적인 것으로 확인되어졌다.
- (2) 선형의 우열 비교로부터 얻어낸 압력 분포의 경향은 조파 저항을 줄여줄수 있는 선형의 개량 방법을 제시하였으며, 이를 이용하여 설계된 새로운 5500TEU 컨테이너 운반선은 조파 저항의 계산 및 실험에서 공통적으로 우수하게 개선되었다.
- (3) 경계조건으로 입력된 압력값은 실제의 형상을 구성하지 못하는 비현실적일 수도 있었으나 형상 수정에 대해 작은 값의 완화 계수가 해의 발산을

방지하는 역할을 하여 형상의 변화가 원활히 이루어지도록 할 수 있었다.

- (4) 수치 계산에 선형 순정을 포함시킨다면 설계 제한조건의 부과에 의한 해의 발산을 방지할 수 있을것으로 판단된다.
- (5) 개발되어진 설계법은 설계자가 원하는 압력 분포를 가지는 형상을 얻어낼 수 있다는 점에서 추진 관점의 선체효율 향상이나 선체, 추진기, 타간의 간섭 현상의 개선에도 적용 될 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 유재훈, "판요소법을 이용한 선수형상 설계에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교, 1996.
- [2] Lee, C.S., Kim, Y.G. and Suh, J.C., "A Surface Panel Method for Design of Hydrofoils," JSR, Vol.38 No.3, 1994.
- [3] Batchelor, G.K., "An Introduction to Fluid Dynamics," Cambridge University Press, U.K., 1967.
- [4] Van, S.H., "Numerical Calculation of the Flow around a Ship by Rankine Source Distributions," KIMM Report, UCE404-1301, 1988.
- [5] 이창섭, 서정천, "쌍곡면패널에의 다이폴 분포," 대한조선학회연구집, 제32권 제2호, 1995.