

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

## 최소조파 저항성능을 갖는 최적 선수형상에 관한 연구

김 성 은\*

### A Study on the Optimal Forebody Forms for Minimum Wave Resistance

by

Kim, Sung Eun \*

#### 요 약

조파저항과 마찰저항이 최소가 되는 선수형상을 구하기 위한 최적화문제에 관한 연구를 수행하였다. 선미부는 기존선형으로 고정하며 선수부만의 offsets을 설계변수로 하였다. 구하고자 하는 최적선형을 기존선형과 이에 대한 미소변화량으로 나누어 조파저항계산시 기존선형에는 Neumann-Kelvin 이론을 적용하고 미소변화량에는 thin ship 이론을 적용하였으며 마찰저항은 ITTC 1957 모형선-실선 상관곡선을 이용하였다. 선체표면을 모양함수(shape function)를 이용하여 근사시켰고, 이로부터 목적함수인 조파저항과 마찰저항은 offsets에 대한 2차식 형태로 표현되므로 선형구속조건을 적용하면 2차계획(quadratic programming)문제를 세울 수 있으며 complementary pivot method를 이용하여 해를 구하였다. 대상선형은 Series 60  $C_B = 0.6$ 이고  $F_n = 0.289$ 에서 최적화하였으며, 적절한 구속조건을 주어서 현실적인 최적선수형상을 구하고자 하였다. 본 방법으로 구한 최적선형은 thin ship 이론만을 이용하여 구한 선형과 비교할 때 설계속도  $F_n = 0.289$ 에서 약간의 조파저항성능 개선(1.92%)를 가져왔다.

#### Abstract

A study on the optimization problems to find forebody shapes with minimum wavemaking and frictional resistance was performed. The afterbody was fixed as a given hull and only forebody offsets were treated as design variables. Design variables were divided into the offsets of given hull and small variation from them. For the wavemaking resistance calculation, Neumann-Kelvin theory was applied to the given hull and thin ship theory was applied to the small variation. ITTC 1957 model-ship correlation line was used for the calculation of frictional resistance. Hull surface was represented mathematically using shape function. As object function, such as wavemaking and frictional resistance,

발표: 1990년도 대한조선학회 추계연구발표회 ('90. 11. 10)

접수일자: 1991년 1월 7일, 재접수일자: 1991년 4월 24일

\* 정회원, 대우조선공업(주)

was quadratic form of offsets and constraints linear, quadratic programming problem could be constructed. The complementary pivot method was used to find the solution of the quadratic programming problem. Calculations were performed for the Series 60  $C_b=0.6$ , at  $F_n=0.289$ . A realistic hull form could be obtained by using proper constraints. From the results of calculation for the Series 60  $C_b=0.6$ , it was concluded that present method gave optimal shape of bulbous bow showing a slight improvement in the wave resistance performance at design speed  $F_n=0.289$  compared with the results from the ship theory only.

## 1. 서 론

우수한 저항성능을 갖는 경계선형을 개발하고자 하는 노력이 그동안 많은 선박유체역학자나 설계자들에 의해 수행되어 왔다. 지금까지 수행되어온 연구결과들을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

정수중을 일정 속도로 전진하는 선체의 조파저항을 예측하기 위한 이론적인 접근은 1898년 Michell[1]에 의해 처음으로 시도되었다. 그의 결과에 의하면 조파저항은 선체의 중심면에 특이점을 분포함으로써 중심면에 대한 중적분의 형태로 표현되는데 이를 Michell의 적분이라 한다.

1930년 Weinblum[2]은 조파저항이 최소가 되는 선형을 구하기 위해 Michell의 적분을 처음으로 이용하였다. Krein(1959), Maruo & Bessho(1963), Kotik & Newman(1964) 등은 변분법(Calculus of Variation)을 이용하여 선체형상의 길이방향의 변화만을 고려한 최소조파저항선형 즉, 최적홀수선형상을 구하였다. 비록 길이방향으로의 형상의 변화를 무시하였으나 이들의 연구결과로부터 최적선형에 대한 여러 가지 중요한 성질들이 밝혀지게 되었다.

Webster & Wehausen(1962)은 마찬가지로 변분법을 이용하여 길이방향으로의 형상변화까지 고려하고 선미부는 고정하여 선수부의 최적형상을 구하였다. 그 결과 형상의 변화가 너무 심한 비현실적인 선형이 얻어졌다. 이를 피하기 위하여 일찌기 Weinblum(1957)은 최소화하

기 위한 목적함수에 마찰저항도 포함시킬 것을 제안한 바 있다. 마찰저항은 선체표면적에 비례하므로 표면적이 비현실적으로 커지는 등 선체형상의 급격한 변화를 억제할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

1963년 Lin, Webster & Wehausen[3]은 마찰저항을 고려하여 최적선형을 구하였는데 형상의 급격한 변화를 어느 정도 줄일 수 있다.

그러나 앞에서 언급된 방법들은 설계변수가 선체의 중심면에 분포된 특이점의 세기이거나 선체의 형상을 나타내는 다항식의 계수이기 때문에 다양한 형태의 구속조건을 적용하는 것은 매우 힘들다. 따라서 일부 offsets이 음수가 되는 경우가 발생할 수 있으며 이를 근본적으로 피할 수 없는 문제점을 안고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 1981년 Hsiung[5]은 설계변수로 offsets을 이용하였으며 부등식 구속조건을 주어서 해가 음수가 되는 것을 피할 수 있도록 하였다. 그는 선체를 텐트함수를 이용하여 수식으로 표현한 뒤 thin ship 이론을 적용하여 조파저항을 offsets에 대한 2차식 형태로 나타낼 수 있었다. 주어진 구속조건을 만족하면서 조파저항이 최소가 되는 offsets을 구하기 위해 2차 계획(quadratic programming)문제의 해를 구하였다.

그는 마찰저항도 고려하여 Series 60 선형의 최적선수 형상을 구하였으며(1984), Calisal[7]은 같은 방법을 어선의 선형개발에 적용한 바 있다(1988).

그러나 지금까지 언급한 방법들은 조파저항

에 대한 해석을 thin ship 이론에 의존하고 있으므로 thin ship이론을 갖고 있는 이론적인 한계 즉, 기존 선형이 낡았해야 한다는 제약을 안고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 일찌기 Sharma (1966, 1968)는 구하고자 하는 선형을 선형화 (linearization) 의 관점에서 기존선형과 이에 대한 미소 변화량으로 나누어 선형이론을 적용할 수 없는 기존선형에는 파형해석(wave pattern analysis) 실험결과를 이용하고 미소변화량에는 thin ship 이론을 적용할 것을 제안하였다. 그후 Sharma & Naegle(1970)은 구상선수(bulbous bow)의 최적 크기와 위치를 성공적으로 구할 수 있었으나 그들의 방법으로는 구상선수의 형상을 결정하는 과정에서 상당한 부분을 설계자의 경험에 의존해야 함을 지적하였다.

국내에서도 위와 같은 반실험적 방법을 이용하여 최적 선수형상을 구하기 위한 연구가 시도된 바 있으며[10], 파형해석을 이용한 선형개발은 현재도 계속 이루어지고 있다.

본 연구에서는 기존선형에 대한 파형해석을 Neumann-Kelvin 이론을 이용하여 수치적으로 수행하고 미소변화량에 대해서는 thin ship 이론을 적용하여 Hsiung이 제안한 최적화 기법을 따라서 최적선수형상을 구함으로서 thin ship 이론을 보완하고 파형 해석에 소요되는 시간과 경비를 줄일 수 있도록 하였다.

2. 선체의 수학적 표현

선체를 수학적으로 표현하는 것은 선형을 설계하고 개선하는 과정에서 유용하며 전산기를 이용한 수치 해석시에도 편리하다. Hsiung[5]은 최적선형개발에 관한 그의 연구에서 선체의 수학적 표현을 위해 텐트함수를 사용하였다. 텐트함수는 각 절점을 기준으로 단위값을 가지며 주변 절점에서는 0이 되는 근사함수이다.

그러나 이 방법을 이용하면 수식의 전개과정

이나 전산처리에 불편한 점이 많다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 유한요소법에서 사용하는 방법과 같이 각 요소를 기준으로 근사함수를 정의하여 사용하고자 한다.

하나의 사각형 요소는 4개의 절점으로 이루어지며 각 절점에 주어진 offsets을 적절한 근사함수를 이용하여 수식으로 표현되며, 선체는 각 요소들의 합으로 표현된다.

임의의 I번째 사각형 요소는 다음과 같다.

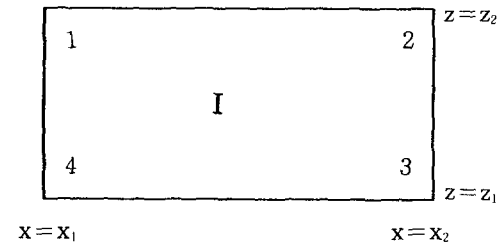


Fig. 1 I - th Element

I 번째 사각형 요소 내에서 정의된 선체표면식  $\hat{h}_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{h}_i = (v_1 h_1 + v_2 h_2 + v_3 h_3 + v_4 h_4) \quad (1)$$

$$h_1 = \left(1 - \frac{x_1 - x}{x_1 - x_2}\right) \left(1 - \frac{z_1 - z}{z_2 - z_1}\right)$$

$$h_2 = \left(1 - \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right) \left(1 - \frac{z_2 - z}{z_2 - z_1}\right) \quad (2)$$

$$h_3 = \left(1 - \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right) \left(1 - \frac{z_1 - z}{z_1 - z_2}\right)$$

$$h_4 = \left(1 - \frac{x_1 - x}{x_1 - x_2}\right) \left(1 - \frac{z_1 - z}{z_1 - z_2}\right)$$

따라서 전체 선체표면식 f는 각 요소에서 정

의된 선체 표면식  $\hat{h}_i$ 들의 합으로 표현된다.

$$f = \sum_{i=1}^{ELEM} \hat{h}_i \quad (3)$$

3. 저항 계산

선박의 저항은 일반적으로 Reynolds수에 의존하는 점성저항과 Froude수에 의존하는 비점성저항으로 분리할 수 있다. 점성저항은 다시

마찰저항과 형상저항으로 나누어지며, 비점성 저항은 파형(wave pattern)형성에 의한 선형 조파저항 성분과 쇄파(wave breaking) 현상에 의한 성분으로 나누어 진다.

Wehausen[4]이 지적한 바와 같이 마찰저항은 선체표면적에 비례하므로 선형의 개선으로 마찰저항을 크게 줄이는 것은 기대하기 힘들다.

형상저항은 주로 선미에서의 유동박리(flow separation)현상이나 만곡부 볼텍스(bilge vortex)의 발생에 의해 크게 지배받으며 선미형상과 밀접한 관계가 있다. 설계수준의 향상으로 실선에 적용되고 있는 대부분의 선미선형은 유동박리현상이 거의 발생하지 않으므로 형상저항이 전체저항에서 차지하는 비중은 크지 않다. 따라서 선미 형상은 저항측면에서의 개선의 여지가 많지 않다. 또한 개선하고자 해도 이론에 근거한 선미형상의 개선은 매우 어렵다. 더구나 선미형상은 저항성능 뿐 아니라 추진성능도 함께 고려하여 설계되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 선미형상은 주어진 선형으로 고정하고 선수부만을 변화시켜 마찰저항과 조파저항이 최소가 되는 최적선수형상을 구하고자 한다.

마찰저항과 조파저항만을 고려하여 구한 최적선수형상은 어느 정도 형상저항의 증가를 가져온다. 그러나 선수형상의 변화가 선수부에 유동박리를 발생시키지 않는한 형상저항의 증가량은 작을 것으로 예상된다. 한편, Eckert & Sharma(1970)는 최적구상선수에 관한 실험결과로부터 조파저항을 줄이기 위해 설계된 구상선수가 조파저항이 차지하는 비중이 작은 저속선에서도 우수한 성능을 보여주는 이유로 구상선수가 선수 주위의 유체 흐름을 개선하여 쇄파 현상을 감소시켜 줄 수 있음을 지적한 바 있다. 이에 따르면 선수형상변화에 따른 형상저항의 증가는 쇄파저항의 감소로 인해 어느 정도 상쇄될 것으로 기대할 수 있다. 따라서 선수부 형상 결정에 있어서 선형 조파저항이론

만으로도 충분한 의미를 갖는다.

선수부 형상의 미세한 변화는 조파저항 성능을 크게 변화시키기 때문에 선수부 형상 특히 구상선수 형상의 결정에는 많은 설계 경험을 요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 마찰 저항과 조파저항의 합이 목적 함수이며 offsets이 설계 변수가 되는 최적화 문제의 해를 수치적으로 구하여 최적 선수형상을 구하고자 한다.

### 3. 1 마찰 저항

선체의 마찰저항은 침수표면적에 해당하는 등가면적의 평판의 마찰저항으로 대신한다.

$$R_f = 1/2 \rho S U^2 \cdot C_f \quad (4)$$

이때 마찰저항계수  $C_f$ 는 ITTC 1957년 모형선-실선상관 곡선을 사용하기로 한다.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (5)$$

선체표면은 선체의 측면과 바닥면으로 이루어진다. 먼저 선체의 측면적은 식 (1), (2), (3)에 정의된 선체 표면식으로부터 구할 수 있다.

$$S_s = \sum_{i=1}^{ELEM} \hat{S}_i$$

and

$$\begin{aligned} \hat{S}_i &\cong 2 \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_1}^{z_2} 1 + 1/2 \hat{h}_{ix}^2 + 1/2 \hat{h}_{iz}^2 dx dz \\ &= 2 \{ (x_2 - x_1) (z_2 - z_1) + \\ &\quad \frac{1}{8} \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} y_1^T A y_1 + \frac{1}{8} \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} y_1^T B y_1 \} \end{aligned} \quad (6)$$

where

$$A = \begin{pmatrix} 1/3 & -1/3 & -1/6 & 1/6 \\ -1/3 & 1/3 & 1/6 & -1/6 \\ -1/6 & 1/6 & 1/3 & -1/3 \\ 1/6 & -1/6 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1/3 & -1/3 & -1/6 & 1/6 \\ -1/3 & 1/3 & 1/6 & -1/6 \\ -1/6 & 1/6 & 1/3 & -1/3 \\ 1/6 & -1/6 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix}$$

식 (6)에서 첫째항은 I번째 요소에 대한 중심면에서의 면적이며 나머지는 각각 길이방향,

깊이방향으로의 선체표면의 기울기에 의한 면적증가량이다.

따라서 측면적 Ss는 offsets에 대한 2차식 형태이며 positive semidefinite임을 알 수 있다.

$$y_i^T A y_i = 1/3 (y_1 - y_2)^2 - 1/3 (y_1 - y_2) (y_3 - y_4) + 1/3 (y_3 - y_4)^2 \geq 0$$

$$y_i^T B y_i = 1/3 (y_1 - y_4)^2 - 1/3 (y_1 - y_4) (y_2 - y_3) + 1/3 (y_2 - y_3)^2 \geq 0$$

(7)

전체 침수표면적은 선체의 바닥면적과 측면적의 합이므로 다음과 같다.

$$S = S_c + S_b^T y + y^T S_{ss} y$$

(8)

where

- y : offsets 벡터
  - S<sub>c</sub> : 선체 중심면의 면적
  - S<sub>b</sub> : 선체 바닥면적에 관한 계수
  - S<sub>ss</sub> : 선체 측면적에 관한 계수
- $$= 2 \sum_{I=1}^{ELEM} \frac{1}{8} \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} A + \frac{1}{8} \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} B$$

### 3.2 조파 저항

무한수심인 정수중을 일정한 속도로 전진하는 선체의 조파저항은 선체 후방에서의 파형해석을 수행하여 구할 수 있다.

$$R_w = \frac{\rho \nu^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} [P^2 + Q^2] \sec^3 \theta d\theta$$

(9)

이때 P, Q는 선체 표면에서의 적분 형태인 Kochin 함수의 일종으로 선체의 교란에 의해 발생한 파의 무한후방에서의 거동을 보여주는 파진폭함수(wave amplitude function)이다.

구하고자 하는 선형을 기존선형과 이에 대한 미소변화량의 합으로 생각하기로 한다. 이때 y는 선체의 반폭을 의미한다.

$$y = y_0 + \delta y$$

(10)

기존선형에는 선체의 형상에 제약이 없는 Neumann-Kelvin 이론을 적용하고 미소변화량에는 thin ship 이론을 적용하면 구하고자 하는 선형에 대한 파진폭함수는 다음과 같은 선형중첩이 가능하다.

$$P \cong P_{No} + P_w \delta y$$

$$Q \cong Q_{No} + Q_w \delta y$$

(11)

P<sub>No</sub>, Q<sub>No</sub>는 Neumann-Kelvin 이론에 따르면

$$P_{No} + Q_{No} = \iint_{S_0} \sigma(\xi, \eta, \zeta) e^{i\nu \zeta \sec^2 \theta} e^{i\nu \zeta \sec^2 \theta [\xi \cos \theta + \zeta \sin \theta]} ds$$

$$- \frac{1}{V} \int_{CBO} \sigma(\xi, \eta, 0) e^{i\nu \zeta \sec^2 \theta [\xi \cos \theta + \zeta \sin \theta]} n_x dl$$

(12)

한편 P<sub>w</sub>, Q<sub>w</sub>는 thin-ship 이론과 식 (1), (2), (3)을 이용하여 구할 수 있다. P<sub>w</sub>항을 살펴보면 다음과 같으며 Q<sub>w</sub>항도 이와 유사하다.

$$P_w = \sum_{I=1}^{ELEM} P_{wI}$$

$$= \sum_{I=1}^{ELEM} (P_1 \ -P_1 \ P_2 \ -P_2)_I^T$$

(13)

where

$$P_1 = \frac{\sin(\nu x_2 \sec \theta) - \sin(\nu x_1 \sec \theta)}{(x_1 - x_2)(z_1 - z_2)(\nu \sec \theta)}$$

$$\{(z_2 - z_1) \frac{e^{\nu z_2 \sec^2 \theta}}{\nu \sec^2 \theta} - \frac{e^{\nu z_2 \sec^2 \theta}}{\nu^2 \sec^4 \theta} - \frac{e^{-\nu z_1 \sec^2 \theta}}{\nu \sec^2 \theta}\}$$

$$P_2 = \frac{\sin(\nu x_2 \sec \theta) - \sin(\nu x_1 \sec \theta)}{(x_1 - x_2)(z_1 - z_2)(\nu \sec \theta)}$$

$$\{(z_2 - z_1) \frac{e^{\nu z_1 \sec^2 \theta}}{\nu \sec^2 \theta} - \frac{e^{\nu z_2 \sec^2 \theta}}{\nu^2 \sec^4 \theta} - \frac{e^{-\nu z_1 \sec^2 \theta}}{\nu \sec^2 \theta}\}$$

참고로 I번째 요소만에 의한 파진폭함수를 살펴보면 offsets에 대한 2차식 형태이며 positive semidefinite임을 알 수 있다.

$$y_i^T P_{wI}^2 y_i = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} P_1^2 & -P_1^2 & P_1 P_2 & -P_1 P_2 \\ -P_1^2 & P_1^2 & -P_1 P_2 & P_1 P_2 \\ P_1 P_2 & -P_1 P_2 & P_2^2 & -P_2^2 \\ -P_1 P_2 & P_1 P_2 & -P_2^2 & P_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}$$

$$= P_1 (y_1 - y_2)^2 + P_2 (y_3 - y_4)^2 \geq 0$$

(14)

이때 P<sub>wI</sub><sup>2</sup>은 I번째 요소의 P성분 파진폭함수를 나타내는 벡터 P<sub>wI</sub>의 자기자신에 대한 dyadic을 의미한다. 따라서 조파저항은 식(12), (13)으로부터

$$R_w = R_{w0} + A_w^T y + y^T B_w y$$

(15)

where

$$R_{w_0} = \frac{\rho V^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sec^3 \theta \, d\theta$$

$$[ (P_{N_0} - P_w y_0)^2 + (Q_{N_0} - Q_w y_0)^2 ]$$

$$A_w = \frac{\rho V^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sec^3 \theta \, d\theta$$

$$[ 2(P_{N_0} - P_w y_0)P_w + 2(Q_{N_0} - Q_w y_0)Q_w ]$$

$$B_w = \frac{\rho V^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} [P_w^2 + Q_w^2] \sec^3 \theta \, d\theta.$$

식 (15)에서 이차항의 계수는 thin ship 이론에 의한 결과이며 기존선형에 대하여 Neumann-Kelvin 이론을 적용하여 파형해석을 수행한 결과는 일차항에 포함되어 있다.

#### 4. 최적화 기법

##### 4.1 목적 함수

최적화하기 위한 목적함수는 마찰저항과 조파저항의 합이 된다. 식 (8), (15)로부터 목적함수는 offsets에 대한 2차식 형태임을 알 수 있다. 설계변수는 선수부의 offsets이다. 선미부는 주어진 offsets으로 고정시켜 상수항으로 처리된다. 여기에 선형구속조건을 부여하면 선수부 offsets에 대한 2차계획문제를 세울 수 있다.

$$\text{Minimize } f(y) = C^T y + y^T P y$$

$$\text{Subject to } Ay \geq b \quad (16)$$

$$y \geq 0$$

##### 4.2 구속 조건

적절한 구속조건의 설정은 식 (16)의 최적해를 구하기 위한 필요조건이 된다. 선형의 최적화 문제에서 적절한 구속조건을 설정하는 것은 매우 중요하며 따라서 고도의 설계경험을 구속조건에 반영할 수 있어야 한다.

일반적인 구속조건은 offsets에 대한 일차식의 형태를 갖는다.

##### 1. 하한치 설정

$$y \geq \alpha y_0, \quad 0 < \alpha < 1$$

##### 2. 상한치 설정

$$y \leq \beta y_0, \quad 1 < \beta$$

##### 3. 선수각(angle of entrance)

$$\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \leq \tan \theta_{\max}$$

##### 4. 수직경사가

$$\frac{z_i - z_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \geq \tan \phi_{\min}$$

##### 5. 수선면적 고정

$$\sum (x_i - x_{i-1})(y_i + y_{i-1}) / 2 = A_w$$

##### 6. 단면적 고정

$$\sum (z_j - z_{j-1})(y_j + y_{j-1}) / 2 = A_M$$

##### 7. 배수용적 증가량

$$\sum (x_i - x_{i-1})(z_j - z_{j-1})(y_i + y_{i-1}) / 4$$

$$\leq (1 + \delta) C_B$$

이때 등식구속조건(equality constraint)은 두 개의 부등식구속조건(inequality constraint)으로 처리된다.

##### 4.3 최적해

식 (16)은 전형적인 2차계획문제이다. 특히 앞에서 언급한 바와 같이 구하고자 하는 목적함수의 2차항의 계수가 positive semidefinite인 경우 convex quadratic programming 문제라 한다. 이때는 국부최소점(local minimum)이 곧 전체최소점(global minimum)이 되므로 최적해를 구하기만 하면 전체최소점을 구하는 것이 된다.

convex quadratic programming의 경우 Kuhn-Tucker 조건은 최적해를 구하기 위한 필요충분조건이다. Kuhn-Tucker 조건을 적용하면 식 (16)은 complementary pivot 문제가 된다.

$$u = 2Py - A^T \alpha + c$$

$$s = Ay - b \quad (17)$$

$$u^T y + s^T \alpha = 0$$

$$y, \alpha, u, s \geq 0$$

where

- y : design variables
- α : Lagrangian multipliers
- u, s : slack variables

이 문제에 대한 해는 complementary pivot method를 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 이 방법은 Lemke(1965)가 제안한 것으로 초기값과 허용오차 없이 엄밀한 해를 구할 수 있다.

Complementary pivot method는 convex quadratic programming문제에 대한 가장 우수한 해법으로 알려져 있다. 또한 비선형 최적화 문제에도 유용하다. 즉 비선형 문제를 연속적으로 1차근사(linear approximation)하여 선형계획문제(linear programming)를 푸는 것 보다는 2차근사하여 2차계획문제를 푸는 것이 더욱 효과적이다. 따라서 선박 설계와 관련된 여러가지 최적화 문제에도 활용될 수 있기를 기대한다.

## 5. 계산 결과

### 5.1 대상 선형

Series 60  $C_B = 0.6$  선형은 조파저항계산 및 최적 선형 결정에 관한 연구에서 많이 이용되어 왔다. 기본제원은 다음과 같다.

Series 60 Model 4210W Todd(1963)

B/Lpp	0.133
T/Lpp	0.0533
Lpp	200 ft
$C_B$	0.6
S/Lpp(2T+B)	0.710

Fig.2는 정면도(body plan), 반폭도(half-breadth plan)를 보여주고 있다. Thin ship 이론에 의한 저항계산을 위해 길이방향으로 19, 깊이방향으로 6 분할하였다.

Fig.3은 Neumann-Kelvin 문제를 해석하기 위해 선체표면을 모델링한 결과이다. 선체측면은 180개, 바닥면은 32개의 삼각형 평면요소로 분할하였다. 각 평면요소에는 세기가 일정한 Havelock source가 분포된다.

Fig.4에서는 수치 알고리즘의 검증을 위해 대상선형에 대한 조파저항계산을 수행하고 이를 실험치와 비교하였다. 실험치는 1984년 17차 ITTC에 제출된 자료로 파형 해석에 의한

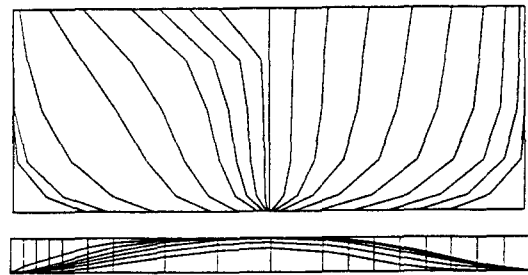


Fig. 2 Lines of Series 60  $C_B=0.6$

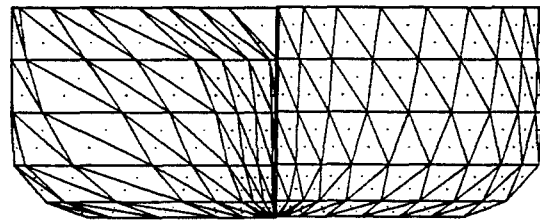


Fig. 3 Body plan of Series 60  $C_B=0.6$

결과이다. Thin ship 이론에 의한 계산은 정성적인 경향은 잘 보여주고 있으나 실험치에 비해 과장된 값을 준다. Neumann-Kelvin 이론에 의한 계산시 선적분항(waterline integral)항은 수치적인 어려움으로 인해 고려하지 않았다. 고속영역에서는 실험치와 잘 일치하고 있으나 선적분항이 중요시 되는 저속영역에서는 상당한 차이를 보인다. 선적분항 항의 처리는 앞으로 더 많은 연구를 필요로 한다. 그러나 정성적인 경향을 보여 줄 수 있으면 최적선형을 구하는 문제에서는 충분한 의미를 갖는다. 하나의 선속에 대하여 workstation 기종인 DECsystem 3100에서 약 30분 정도의 계산시간이 소요된다.

설계 속도  $F_n=0.289$ 에서의 저항값은 다음과 같다.

	thin ship theory	N-K theory w/o L.I.
$C_r$	$1.641 \times 10^{-3}$	$1.641 \times 10^{-3}$
$C_w$	$3.912 \times 10^{-3}$	$2.615 \times 10^{-3}$
$C_t$	$5.553 \times 10^{-3}$	$4.257 \times 10^{-3}$

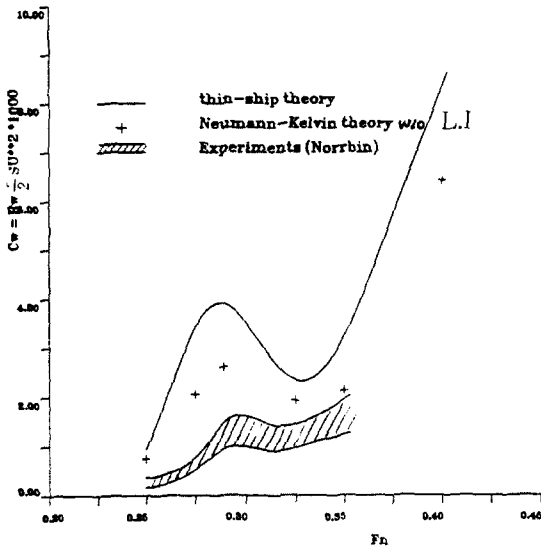


Fig. 4 Wave resistance of Series 60  $C_B=0.6$

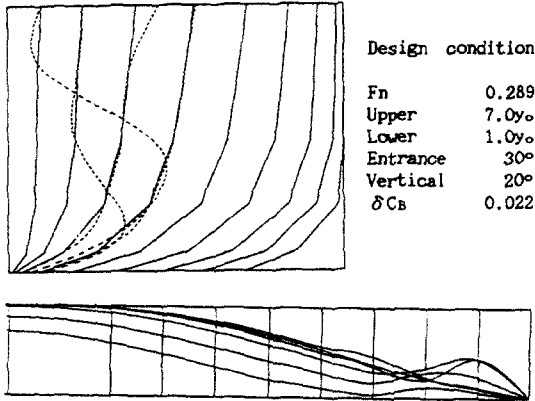


Fig.4-1 Optimal Hull 0

5.2 최적 선형

5.2.1 선형 0

선형0은 thin ship 이론에 의한 조파저항만을 목적함수로 하여 구한 선형이다. 구속조건은 다음과 같다. 설계변수의 하한치를 제한하여 기존선형보다 작아지지 않도록 하였다. 선수각 (angle of entrance)을 30° 이내로 하였으며 수직경사각을 20° 이상으로 하였다. 배수용적의 증가량은 2.2% 이내로 제한하였다. 설계속도  $F_n=0.289$ 에 구한 최적선형 0은 Fig. 4-1과 같다.

Fig. 4-1에서 실선은 기존선형인 Series 60  $C_B=0.6$ 이며 점선은 조파저항이 최소가 되도록 구한 선형이다. 4개의 station을 설계변수로 하였으나 마지막 station은 변화가 없음을 알 수 있다. Thin ship 이론에 의한 설계속도에서의 저항값은 다음과 같다. 저항은  $1/2\rho SU^2$ 으로 무차원화하기로 한다.

기존선형	선형 0	증감(%)
$C_r$ $1.641 \times 10^{-3}$	$1.690 \times 10^{-3}$	+ 3.0
$C_w$ $3.912 \times 10^{-3}$	$2.912 \times 10^{-3}$	- 25.6
$C_t$ $5.553 \times 10^{-3}$	$4.602 \times 10^{-3}$	- 17.1

설계속도에서 조파저항이 25.6% 감소되었음을 알 수 있다. 그러나 이 수치는 순수한 포텐셜 이론에 의한 결과이다. 선수형상을 자세히 살펴보면 선수부에서 유동박리가 발생할 것을 예상할 수 있다. 유동박리가 발생할 경우 조파저항의 감소량은 기대했던 값보다 적어질 것이며 오히려 형상저항의 급격한 증가가 예상된다. 따라서 유동박리를 피하기 위해서는 수선의 기울기가 항상 양의 값을 갖도록 구속조건을 설정해 주어야 한다.

수선경사각  $\theta$  min

$$\tan \theta_{\min} \leq \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$$

5.2.2 선형 I

선형 I은 역시 thin ship 이론에 의한 조파저항만을 목적함수로 하여 구한 선형이다. 모든 구속조건은 선형 0과 동일하나 유동의 박리가 발생하지 않도록 각 홀수선의 경사각을 2° 이상으로 제한하였다. 설계속도  $F_n=0.289$ 에서 구한 최적선형 I은 Fig.5와 같다.

Fig.5를 보면 유동박리현상이 발생할 위험성이 제거된 것을 알 수 있다. Thin ship 이론에 의한 설계속도에서의 저항값은 다음과 같다.

기존선형	선형 I	증감(%)
$C_r$ $1.641 \times 10^{-3}$	$1.682 \times 10^{-3}$	+ 2.5
$C_w$ $3.912 \times 10^{-3}$	$2.029 \times 10^{-3}$	- 22.6
$C_t$ $5.553 \times 10^{-3}$	$4.711 \times 10^{-3}$	- 15.2



조파저항의 감소량은 22.6%로서 25.6%인 선형 O과 큰 차이는 없다. 결과적으로 선형 O은 조파저항을 3% 더 줄이기 위해 형상저항의 급격한 증가를 무릅쓰고 무리한 형상의 변화를 가져온 것이다. 이는 포텐셜이론으로는 형상저항을 목적함수에 포함할 수 없는 것에 원인이 있다. 따라서 수선의 기울기를 제한하는 등 적절한 구속조건을 설정하여 비현실적인 선형이 얻어지는 문제점을 극복할 수 밖에 없다.

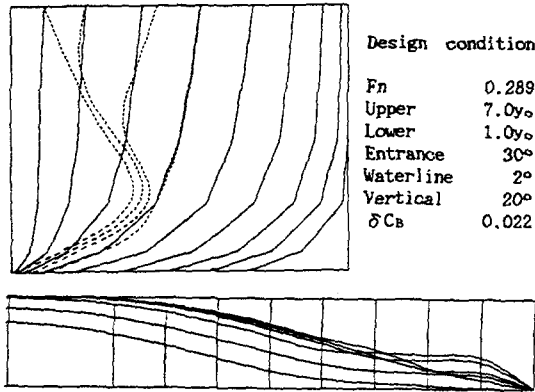


Fig. 5 Optimal Hull I

이다. 설계속도  $F_n=0.289$ 에서 조파저항이 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 저속 영역에서는 오히려 조파저항이 증가하고 있다. 이는 설계속도  $F_n=0.289$ 에서의 최적선형이 저속에서는 적합하지 않음을 의미한다. 십자표시는 다음절에서 설명할 선형 III에 thin ship 이론을 적용하여 구한 조파저항 값들이다. 설계속도에서 선형 III의 조파저항은  $3.122 \times 10^{-3}$ 로 선형 II보다 약간 크다. 그러나 전체적으로 큰 차이는 없다.

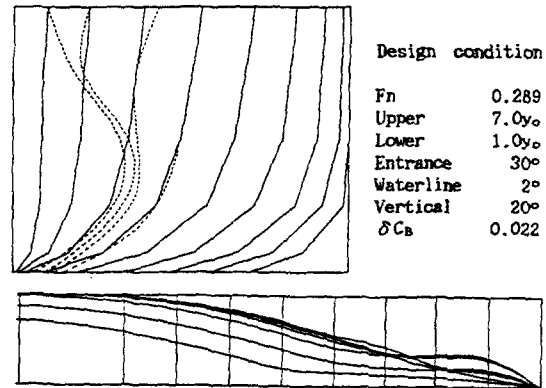


Fig. 6 Optimal Hull II

5.2.3 선형 II

선형 II는 thin ship에 의한 조파저항과 마찰저항을 함께 고려하여 구한 선형이다. 다른 모든 조건은 선형 I과 같다. Fig.6을 보면 구상 선수의 폭이 마찰저항을 줄이기 위해 선형 I보다 줄어들었음을 알 수 있다. Thin ship 이론에 의한 설계속도에서의 저항값은 다음과 같다.

	기존선형	선형 I	증감(%)
$C_r$	$1.641 \times 10^{-3}$	$1.661 \times 10^{-3}$	+ 1.2
$C_w$	$3.912 \times 10^{-3}$	$3.037 \times 10^{-3}$	- 22.4
$C_t$	$5.553 \times 10^{-3}$	$4.698 \times 10^{-3}$	- 15.4

조파저항이 약간 증가하였으나 마찰저항이 감소하여 전체저항은 선형 I보다 작다.

Fig.7은 thin ship 이론에 의한 조파저항곡선

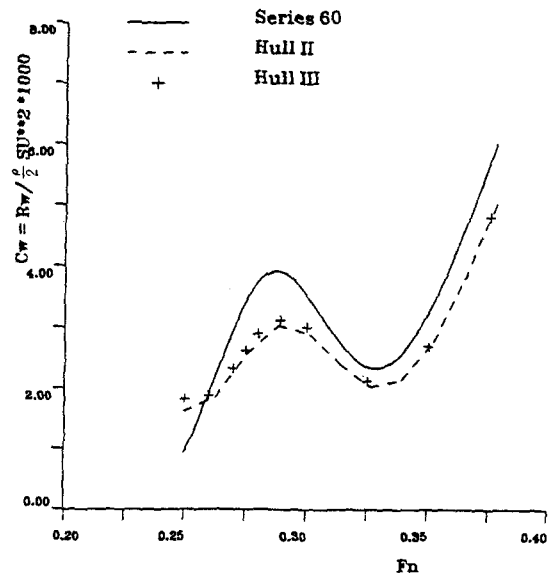


Fig. 7 Wave resistance by thin ship theory

5.2.4 선형 III

선형 III은 기존선형에는 Neumann-Kelvin 이론을, 이에 대한 변화량에는 thin ship 이론을 적용하여 구한 조파저항과 마찰저항을 목적함수로 하여 구한 선형이다. 다른 모든 조건은 선형 II와 동일하다. Fig.8을 보면 Fig.7에 비해 구상선수의 폭이 줄어들었으며 무게중심이 아래로 처지지 않고 위로 이동하였다.

Neumann-Kelvin 이론에 의한 설계속도에서의 저항값은 다음과 같다.

	기존선형	선형 I	증감(%)
Cr	$1.641 \times 10^{-3}$	$1.651 \times 10^{-3}$	+0.6
Cw	$2.615 \times 10^{-3}$	$2.099 \times 10^{-3}$	-19.8
Ct	$4.257 \times 10^{-3}$	$3.750 \times 10^{-3}$	-11.9

Series 60  $C_B=0.6$  선형의 조파저항이  $2.615 \times 10^{-3}$ 이므로 선형 III의 조파저항은 19.8% 감소하였다.

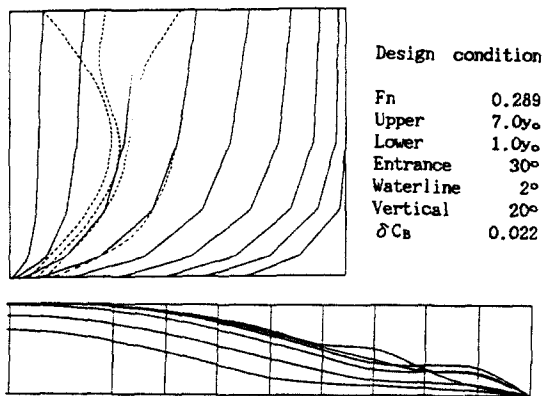


Fig. 8 Optimal Hull III

Fig.9, 10은 식(12)에 정의된 파진폭함수의 성분을 보여 주고 있다.

파 진행 각도가  $36^\circ$   $16'$ 보다 작은 가로파(transverse wave) 성분은 감소하나 발산파(diverging wave) 성분은 증가함을 알 수 있다. 각 성분에 해당하는 조파저항값은 다음과 같다.

	기존선형	선형 I	증감(%)
가로파	$1.451 \times 10^{-3}$	$0.854 \times 10^{-3}$	+ 41.2
발산파	$1.164 \times 10^{-3}$	$1.245 \times 10^{-3}$	- 6.9

합  $2.615 \times 10^{-3}$   $2.099 \times 10^{-3}$  - 19.8  
따라서 조파저항이론에 의한 최적선수형상은 가로파 성분의 저항감소에 기여하며 그 감소량이 발산파 성분의 증가량을 상쇄하고 남음을 알 수 있다.

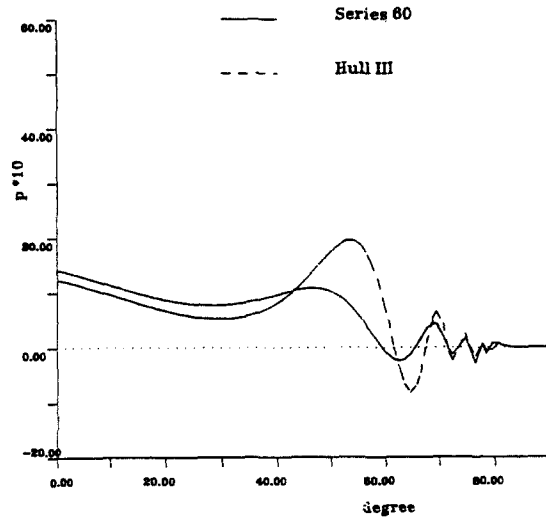


Fig. 9 P component of free wave amplitude spectrum

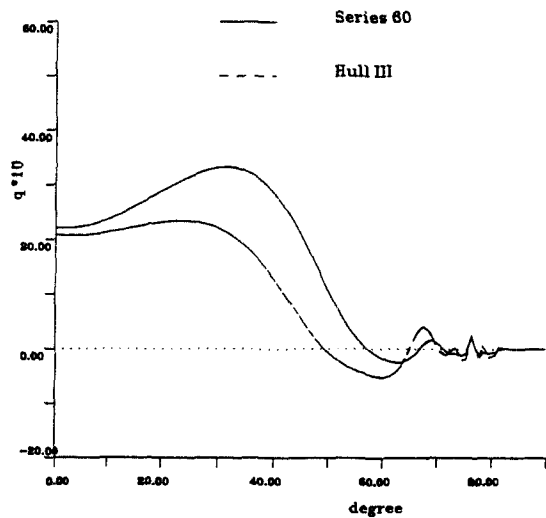


Fig. 10 Q component of free wave amplitude spectrum

Fig.11은 Neumann-Kelvin이론에 의한 조파저항곡선이다. 기존선형에 비해 설계속도에서는 조파저항이 크게 줄었으나 선형 II와 달리 고속영역에서는 오히려 저항이 증가하였다.

또한, 설계속도에서 선형 III의 조파저항은 thin ship 이론을 이용하여 구한 선형 II ( $2.140 \times 10^{-3}$ )에 비해 약 1.92% 정도 감소하였으나 설계속도 이외의 영역에서는 오히려 선형 II 보다 저항이 커져 설계 속도에 매우 민감함을 알 수 있다. 따라서 최적 선형을 구하고자 할 때는 선박의 운항조건에 따른 설계속도를 선정하는 것이 중요하다.

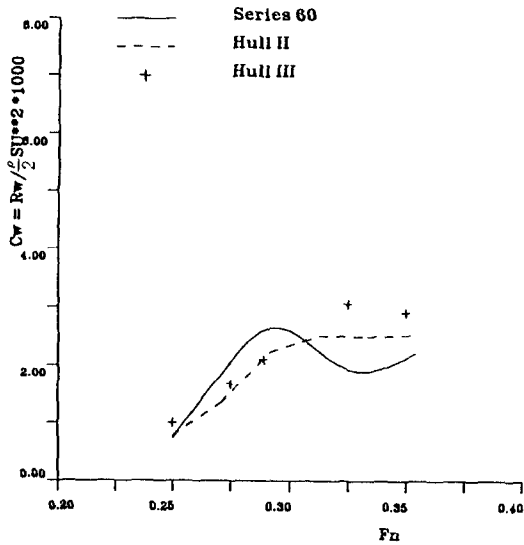


Fig. 11 Wave resistance by Neumann-Kelvin theory W/O L

### 6. 결 론

이상의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 논문에서는 기본적으로 C.C. Hsiung의 최적화방법을 이용하여 최적선수형상을 구하기 위한 연구를 수행하였다.
- 2) 대상선형은 Series 60  $C_B=0.6$ 이며  $F_n=0.289$ 에서 최적화 하였다.
- 3) 최적화하기 위한 목적함수로 마찰저항과 조파저항만을 고려하기 때문에 선수부에서 유동박리현상의 발생에 의해 형상저항의 증가를 가져올 수 있으나 수선의 기울기를 제한하는 구속조건을 사용하여 이를 피할 수 있었다.
- 4) Thin ship 이론의 한계를 극복하기 위해

서 구하고자 하는 선형을 기존선형과 이에 대한 미소변화량으로 나누어 기존선형에는 Neumann-Kelvin 이론을 적용하고 미소변화량에는 thin ship 이론을 적용하였다. Neumann-Kelvin 문제 해석시 waterline integral 항은 수치적인 어려움을 인해 생략하였다.

5) 그 결과 설계속도에서 기존선형에 비해 조파저항이 19.8% 감소한 선형을 구하였다. 이때 가로파 성분은 감소하였으나 발산파 성분은 오히려 증가하였다. 그러나 가로파 성분의 감소량이 발산파 성분의 증가량을 상쇄하고도 남음을 알 수 있었다.

6) Thin ship 이론만을 이용하여 구한 선수형상은 무게중심이 아래로 처진데 비해 본 방법에 의한 결과는 구상선수의 폭이 줄어들고 중심이 약간 위로 이동하여 소위 round type의 형상을 주었다.

7) 그러나 조파저항측면에서는 thin ship 이론을 이용하여 구한 선형에 비해 큰 차이를 주지 못하였는데, 설계속도에서 약 1.9% 정도의 조파저항성능의 개선을 가져왔으나 설계속도 이외의 영역에서는 조파저항성능이 떨어져 설계속도에 매우 민감함을 알 수 있었다.

8) 본 방법에 의한 결과가 thin ship 이론만을 이용한 결과와 큰 차이를 보여주지 않은 것은 조파저항 계산시 thin ship 이론도 Neumann-Kelvin 이론과 정성적으로는 유사한 경향을 줄 수 있기 때문일 것으로 생각된다.

9) 앞으로 본 방법을 실선설계에 활용하기 위해서는 선적분항에 대한 고려와 함께 모형시험을 통한 검증이 필요로 한다.

### 참 고 문 헌

[1] Michell, J.H. "The Wave Resistance of a Ship", *Philosophical Magazine*, Vol.5, No.45, pp 106-122, 1898.  
 [2] Weinblum, G. "Anwendungen der Michellschen Widerstadstheorie", *Jahrb. Schiffbautech. Ges.* 31, 1930.

- [3] Lin, W.C. Webster, W.C. Wehausen, J.V. "Ships of Minimum Total Resistance", Int. Sem. Theoret. Wave Resistance, Ann Arbor, 1963.
- [4] Wehausen, J.V. "The Wave Resistance of Ships", Advances in Applied Mechanics, Vol. 13, Academic Press, 1973.
- [5] Hsiung, C.C. "Optimal Ship Forms for Minimum Wave Resistance", *J.S.R.* Vol.25, No. 2, 1981.
- [6] Hsiung, C.C. "Optimal Ship Forms for Minimum Total Resistance", *J.S.R.* Vol.28, No. 3, 1984.
- [7] Calisal, S.M. "Optimal Hull Forms for Fishing Vessels", *STAR Symposium, SNAME*, 1988.
- [8] DTNSRDC, "Proceedings of the Workshop on Ship Wave Resistance Computation", 1979.
- [9] Todd, F.H. "Some Further Experiments on Single-Screw Merchant Ship Forms—Series 60", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.61, 1963.
- [10] 강신형, 이영길, 현범수, "저항 성분 측정에 의한 선형개발법 연구", 한국기계연구소, 연구보고서, 1982.
- [11] 김성은, 김대규, "저항이론에 의한 최적 선형 개발에 관한 연구", 대우조선 기술연구소, 연구보고서, 1989.