

최적선형개발에 대한 기초연구

최희중* · 전호환* · 정석호**

*부산대학교 조선해양공학과

** STX 조선주식회사 특수사업본부

Fundamental Study for the Development of an Optimum Hull Form

HEE-JONG CHOI*, HO-HWAN CHUN* AND SUK-HO JEONG**

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Busan National University, Busan, Korea

**Special and Naval Shipbuilding Division, STX Shipyard, Jinhae, Korea

KEY WORDS: Optimum Hull Form 최적선형, Minimum Resistance 최소저항, Panel Method 패널법, Sequential Quadratic Programming 순차이차계획법, Wigley Hull 위글리선형

ABSTRACT: A design procedure for a ship with minimum total resistance has been developed using a numerical optimization method called SQP (sequential quadratic programming) to search for different optimal hull forms. The frictional resistance has been estimated using the ITTC 1957 model-ship correlation line formula, and the wave resistance has been evaluated using a potential-flow panel method that is based on Rankine sources with nonlinear free surface boundary conditions. The geometry of a hull surface has been modified using B-spline surface patches, during the whole optimization process. The numerical analyses have been carried out for the modified Wigley hull at three different speeds ($F_n=0.25, 0.316, 0.408$), and the calculation results were compared.

1. 서 론

최소저항을 갖는 최적 선형을 찾고자 하는 노력은 선박유체 역학자들과 선형설계자들의 수세기에 걸친 실험적 경험과 공학적 직관으로 인하여 오늘날의 다소 복잡하지만 저항측면에서 효율적인 선형을 개발하게 되었다. 그러나 이에 대한 수학적 공식화나 체계적인 정립은 아직 이루어지지 못하고 있다. 최소저항의 관점에서 최적화된 선형을 찾고자 하는 선형 최적화에 대한 연구는 적절한 최적화 기법의 선택, 선체 표면의 기하학적인 표현, 설계변수와 제약조건의 적절한 선택, 사용된 CFD(computational fluid dynamics)기법의 유용성과 신뢰성, 그리고 최적화를 수행하고자 하는 선박의 설계속도 등 많은 변수들에 의해 영향을 받으며, 주어진 선형에 대하여 원하는 최적선형을 찾고자 할 경우 이와 같은 종속변수의 올바른 선정은 매우 신중하게 고려되어야 할 요소이다.

최소저항 최적선형의 생성에 있어서 목적함수인 선체에 미치는 저항은 크게 조파저항과 점성저항으로 나눌 수 있다. 점성저항의 경우, 저항성능 이외에 선형이 만족하여야 하는 요구조건들로 인하여 그 값을 크게 줄이기는 어려운 반면, 요구조건을 충족하면서도 최소에너지를 가지는 궤적을 생성하는 선형을 개발할 수 있다는 것은 많은 실험과 관찰에서 알려져 있

다. 정수 중에서 일정속도로 항해하는 선박에 의하여 생성되는 궤적은 선박의 형상 특히 단면적 곡선, 수선면과 횡단면의 형상 등에 많은 영향을 받는다.

선체에 미치는 저항의 예측은 대부분 예인수조에서 시행되는 모형시험에 의존하게 된다. 저항측면에서 요구조건을 충족하는 최적선형을 도출하기 위하여 지금까지는 초기에 경험에 의하여 최적선형을 예측하고, 모형시험을 통하여 선박의 저항성능을 확인한 후, 예측한 선형이 요구조건을 만족하지 못하는 경우, 모형시험결과를 토대로 새롭게 선형을 수정한 후, 모형선을 제작하고 다시 모형시험을 수행하여 선박의 저항성능을 확인하는 반복수행과정을 통하여 최적선형을 구하였다. 그러나 이 경우 여러 척의 모형선제작과 그에 따른 많은 수조시험 등으로 인하여 불가피하게 많은 시간과 경비를 소모하여야 하는 단점이 있다.

최근에 CFD를 이용한 선체주위의 유동해석 및 선체에 미치는 저항을 예측하고자 하는 연구가 컴퓨터의 데이터 처리 속도의 기하학적 발전에 비례하여 급속도로 진척되고 있는 실정이며, 그 계산결과에서도 수조시험값과 비교하여 많은 향상을 보이고 있다. 최근에는 실제 선형의 설계에도 도입되어 사용되고 있는 실정이다.

CFD를 이용하여 최소저항 최적선형을 도출하고자 하는 노력은 CFD와 최적화기법과의 접목으로 이어졌으며, 선박유체역학 및 선박설계를 연구하는 많은 조선공학자들에 의하여 광범위하게 연구되고 있다. 지금까지 CFD와 최적화 기법을 이용한

제1저자 최희중 연락처: 부산광역시 금정구 장전동 산30

051-510-2756 hjchoi@pusan.ac.kr

최소저항 최적선형 도출기법에 대한 많은 연구 논문들이 발표되었다.

김희정과 전호환(1999, 2000)은 WIG 선형과 Series 60 선형에 대한 선형의 최적화를 수행하였다. 그는 목적함수인 조파저항을 구하기 위하여 선형자유수면조건을 고려한 패널법을 사용하여 유동계산을 수행하고, 최적화 기법으로는 빠른 수렴성과 유용성을 보여준 SQP(sequential quadratic programming)법을 사용하여 선형의 최적화를 수행하고 그 결과를 발표하였다. 최희중 등(2003)은 SQP법과 패널법을 사용하여 Series 60 선형과 컨테이너선에 대하여 선수부에 대한 최적화를 수행하고 그 결과를 발표하였다. Janson and Larsson(1996)은 Series 60 선형에 대한 선형의 최적화를 수행하였는데, 선수부분의 유동은 포텐셜 유동으로 가정하고, 선미부분의 유동은 점성유동으로 가정하여 목적함수인 저항을 구하였고, 배수량을 제한조건으로 하여 최적화 계산을 수행하고 그 결과를 발표하였다. 그리고 Hino et al.(1998), Tahara et al.(1998)은 최적화 기법 중 비선형계획법인 SQP법과 유동해석기법인 RaNS(Keynolds-averaged Navier Stokes)을 이용하여 실선에 대한 최적화를 수행하여 전체저항이 감소하는 선형을 제시한 바 있다.

그리고 Daniele et al.(2001)은 최적화 기법 중 직접탐색법인 SD(steepest descent)법, CG(conjugate gradient)법, SQP법을 이용하여 유조선의 선수부 벌브 근처에 대하여 선체의 형상을 변화시켜가면서 최적화를 수행하고 모형실험을 통하여 그 결과를 비교 검증하였다. Day and Doctors(1997)는 최적화 기법으로 생물 진화의 원리로부터 착상된 확률적 탐색법인 GA(genetic algorithm)법을 사용하고, 목적함수인 전저항 중에서 조파저항성분을 구하기 위하여 Michell의 얇은배 이론(thin ship theory)을 사용하였고, 마찰저항은 ITTC 1957년 공식을 사용하여 목적함수를 구하여 선박최적화를 수행하고 그 결과를 발표하였다. Hendrix et al.(2001)은 포물선형의 수학선형인 Wigley 선형에 대하여 서로 다른 3가지 속도에 대하여 최적선형을 도출하고 선형들을 서로 비교하였다. 그는 조파저항은 Havelock에 의하여 제안된 공식을 사용하여 구하였고, 마찰저항은 ITTC 1957 공식을 사용하여 구하였다.

본 연구의 목적은 최소저항을 가지는 최적선형을 도출하는 최적화 프로그램을 개발하는 것이다. 본 연구에서 사용한 최적화 기법은 빠른 수렴속도를 가지며, 그 유용성이 입증된 비선형계획법인 SQP법을 사용하였다. 목적함수인 전저항 중 조파저항성분을 구하기 위하여 자유수면의 비선형성을 고려한 비선형 랜킨소오스 패널법을 사용하였다. 선체 주위의 유동의 계산시 선체의 침하(sinkage) 및 트림(trim)을 고려하였으며, 마찰저항성분은 ITTC 1957년 공식을 사용하여 구하였다. 매 반복 계산시 선체표면의 표현과 변형은 B-spline곡면 패치를 사용하여 구현하였다.

위와 같은 방법을 사용하여 개발된 선형 최적화 프로그램의 검증 및 검토를 위하여 포물선형의 수학선형인 Wigley 선형에 대한 선형 최적화 수치계산을 수행하고 그 결과 및 진화과정을 초기선형과 최적선형에 대하여 서로 비교하였다. 그리고 선속의 변화에 따른 선형의 변화 양상을 보기 위하여 $F_n=0.25, 0.316, 0.408$ 에 대한 최적화 수치계산을 수행하고 그 결과를 서로 비교하였다.

2. 최적화 알고리즘

최소저항을 가지는 최적선형의 도출에 대한 최적화 문제의 일반식은 다음과 같다.

2.1 최적화 문제

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(x) \\ & \text{subjected to} && g_j(x) = 0, \quad j=1, \dots, m_e \\ & && g_j(x) \geq 0, \quad j= m_e+1, \dots, m \\ & && x_l \leq x \leq x_u \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

- f : 목적함수 (object function)
- x : 설계변수 (design variable)
- g : 제약조건 (constraint condition)
- m : 제약조건의 수 (number of constraint condition)
- m_e : 등식제약조건의 수 (number of equality condition)
- x_u : 설계변수의 상한 (upper limit of design variable)
- x_l : 설계변수의 하한 (lower limit of design variable)

본 연구에서는 최적화 문제를 풀기 위하여 비선형 최적화 기법인 SQP법을 사용하였다. SQP법은 비선형의 목적함수와 제약조건을 설계변수에 대해서 Taylor 전개하고, 목적함수는 이차식으로 제약조건은 일차식으로 근사하여 근사 부분제를 얻는다(Vanderplaats 1984). 근사 부분제를 탐색방향에 대하여 정리하면 다음과 같다.

2.2 비선형 계획 알고리즘

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \frac{1}{2} d^T B d + \nabla f(x)^T d \\ & \text{subjected to} && \nabla g_j(x)^T d + g_j(x) = 0, \\ & && \quad \quad \quad j=1, \dots, m_e \\ & && \nabla g_j(x)^T d + g_j(x) \geq 0, \\ & && \quad \quad \quad j= m_e+1, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

- d : 탐색방향(searching direction)
- B : Hessian matrix of Lagrange

식(2)의 결과로 목적함수를 감소시키는 방향이 정해지면 이동거리를 결정하여 근사 최적해를 부여한 점을 구한다. 이것을 다음 단계의 설계점으로 하여 반복 적용함으로써 최적해를 얻는다. 매 반복해에서 설계변수는 $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ 에 의하여 변화하며, α_k 는 이동거리를 나타낸다.

3. 목적함수의 계산

최소저항을 가지는 최적선형의 도출에 있어서 최소화하고자 하는 목적함수는 선체에 미치는 저항이다. 저항성분은 크게 조파저항성분과 마찰저항성분으로 나타낼 수 있으며, 이 두 저항성분은 Froude의 가정에 의하여 다음과 같이 서로 분리하여 구할 수 있다.

3.1 조파저항의 계산

포텐셜 이론에 따라 유동은 비점성, 비압축성이며 유체흐름은 비회전성이라는 가정 하에 자유수면 경계조건을 비선형성을 고려한 랜킨소오스 패널법에 의해 선체주위의 유동을 수치 해석으로 계산하여 선체표면에서의 속도성분을 구하였다. 베르누이의 정리를 이용하여 압력계수(C_p)를 구한 다음, 선체표면에 걸쳐서 압력계수를 적분하여 선체에 미치는 조파저항을 계산하였다.

$$C_w = - \frac{\int_S C_p n_x ds}{S} \quad (3)$$

위의 식에서 S 는 침수표면적을 나타내고, n_x 는 선체표면에서의 법선 벡터의 x 방향의 성분을 나타낸다. 자유수면 경계조건식은 비선형 자유수면 경계조건식을 사용하였다 (Raven 1996, 최희중 등 2001, 최희중과 전호환 2001, 이광호 등 1998).

3.2 마찰저항의 계산

마찰저항계수는 ITTC 1957년 모형선-실선 상관곡선을 이용하여 구하였다.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4)$$

위의 식에서 Rn 은 레이놀즈 수(Reynold's number)를 나타낸다.

3.3 전저항의 계산

일정 속도로 항주하는 선체에 미치는 전 저항성분은 크게 조파저항성분과 마찰저항성분에 의하여 결정되며, 본 연구에서는 선체의 3차원적 형상에 대한 영향을 고려한 다음의 식을 사용하여 전저항을 구하였다.

$$R_T = 0.5\rho U^2 S [C_w + C_f(1+k)] \quad (5)$$

위의 식에서 ρ 는 물의 밀도를 나타내고, U 는 선체의 진행 속도를 나타내며, 그리고, $(1+k)$ 는 형상계수를 나타낸다. 형상계수는 Holtrop (1984)이 발표한 식을 사용하였다.

4. 선체의 변형

저항관점에서 최적선형의 도출을 위한 최적화 과정은 초기에 기준선형으로 선택된 선체에 대하여 형상의 변형을 주고 그에 대한 저항 계산을 수행하는 것으로 이와 같은 과정을 여러 번 반복 수행함으로써 최적선형을 찾아가는 것이며, 이 과정 중에 최적화 기법을 도입하여 그 변형의 양상을 찾아내어 적은 계산량으로 빠르게 최적선형을 찾아내는 것이 주목적이다.

변형된 선체형상은 특별한 제약이 없다면 불연속점이나 불연속선이 없이 선체 전반에 걸쳐 부드럽러워야 하며, 변형된 선형에 대한 저항추정을 위하여 유동 수치해석을 위한 계산 격자계를 생성하여야 하며, 이와 같은 계산 격자계의 생성을 위한 변형된 선체에 대한 형상정보가 필요하다. 보통 선형 최적화 문제에서는 계산 격자계 생성과 관련된 인자를 설계변수로 사용하게 되는데, 이 경우 설계변수의 증가는 계산시간의 기하급수적 증가를 나타내므로, 가능하면 적은 수의 설계변수를 사용하는 것이 좋다. 그러나 너무 적은 설계변수를 사용하면 실제 원하는 선형을 얻지 못할 수도 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다.

본 연구에서 선체의 형상의 표현을 위한 선체 표면의 정의를 위하여 B-spline 곡면을 이용하였으며, 그에 대한 정의 식은 다음과 같다.

$$\vec{R}(u, v) = \sum_{j=1}^{N_u} \sum_{i=1}^{N_v} \vec{c}_{i,j} B_i^3(u) B_j^3(v) \quad (6)$$

여기서,

$R(u, v)$: 매개변수형태의 위치벡터(position vector)

$B_i^3(u)$: u -방향에 대한 3차 기저함수(basis function)

$B_j^3(v)$: v -방향에 대한 3차 기저함수(basis function)

$c_{i,j}$: B-spline 꼭지점(defining control vertices)

N_u : u -방향에 대한 B-spline 꼭지점의 개수

N_v : v -방향에 대한 B-spline 꼭지점의 개수

식(6)으로 정의된 B-spline 곡면에 대한 knot 벡터는 u -방향과 v -방향에 대하여 비주기적 비균일 knot 벡터(non-periodic non-uniform knot vector)를 사용하였다.

본 연구에서는 $c_{i,j}$ 를 설계변수로 사용하였다. $c_{i,j}$ 의 초기값은 주어진 기준선형에 대하여 B-spline surface fitting을 하여 구하였다. 최적화 과정 중 설계변수인 $c_{i,j}$ 에 대하여 변형을 주고, 변형된 $c_{i,j}$ 를 사용하여 계산 격자계를 생성하고, 생성된 계산 격자계를 사용하여 유동 수치계산을 수행하여 목적함수인 저항을 구하였다.

5. 수치계산

본 연구에서는 최소저항을 가지는 최적선형의 도출을 위하

수치해석 프로그램을 개발하고, 그에 대한 검증을 위하여 수정된 Wigley 선형에 대하여 최적화 수치계산을 수행하였다. F_n 의 변화에 따른 선형의 변화 양상을 보기 위하여 $F_n = 0.25, 0.316, 0.408$ 의 3가지 경우에 대하여 저항관점에서 최적화 수치계산을 수행하고 그 결과를 서로 비교하였다.

5.1 초기선형의 선정

본 연구에서 최적화 과정에 적용될 초기선형으로 수학선형인 Wigley 선형을 사용하였으며 선체 형상에 대한 정의식은 다음과 같다.

$$\frac{y}{L_{pp}} = \left[1 - 4 \left(\frac{x}{L_{pp}} \right)^2 \right] \left[1 - 256 \left(\frac{z}{L_{pp}} \right)^2 \right] / 20 \quad \text{at } z \leq 0 \quad (7)$$

$$\frac{y}{L_{pp}} = \left[1 - 4 \left(\frac{x}{L_{pp}} \right)^2 \right] / 20 \quad \text{at } z > 0$$

본 연구에서는 목적함수인 전저항 중 조파저항성분을 구하기 위하여 자유수면의 비선형성을 고려한 비선형 랜킨소스패널법을 사용하였으며, 비선형 자유수면 경계조건을 만족하기 위한 반복계산 시 선측파형을 고려하여 선체표면의 격자계를 생성하기 때문에 교란되지 않은 자유수면 위의 부분에 대하여 시도 선체형상을 정의하여야 한다. 본 연구에서는 교란되지 않은 자유수면 위의 부분에 대한 선체표면의 정의를 하기 위하여 $z/L_{pp}=0$ 에서 선체 정의 식을 그대로 자유수면 위의 부분에까지 확장하여 선체표면을 구성하였다.

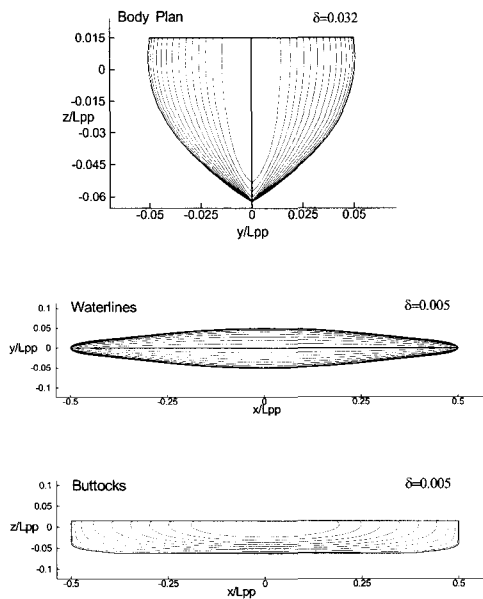


Fig. 1 Lines for the modified Wigley hull taken as initial hull in the optimization

Fig. 1은 초기의 기준선형으로 사용된 선형의 정면도(body plan), 반폭도(half-breadth plan) 그리고 측면도(sheer plan)을 나타낸다. 기준선형은 식(7)로 표현된 Wigley 선형에 대하여 선체의 중앙중단면에서 선체표면의 곡률이 좌현과 우현에 대하여 연속성을 유지하도록 하기 위하여 선체의 표면을 수정한 것을 사용하였다. 여기서, δ 는 윤곽선의 간격(contour interval)을 나타낸다.

5.2 설계변수의 선정

기준선형인 수정된 Wigley 선형의 선체표면을 B-spline surface fitting을 하여 9x5(9개의 단면에 각각 5개의 꼭지점)의 B-spline 꼭지점망(control vertices network)을 구하고, 이 꼭지점들은 설계변수로 사용하였으며, Fig. 2는 설계변수를 도식화한 것이다.

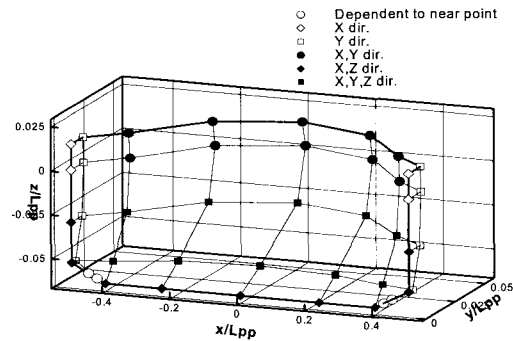


Fig. 2 Design variables for Wigley hull taken as initial hull in the optimization

선형의 최적화가 진행되는 과정 중에 변형된 선체가 적절한 형상을 갖도록 하기 위하여 각각의 설계변수에 대하여 움직일 수 있는 허용범위와 이동방향을 주어 구속하였다. 각 방향의 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -0.700 < x/L_{pp} < 0.700 \\ 0.000 < y/L_{pp} < 0.080 \\ -0.080 < z/L_{pp} < -0.010 \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 \diamond 는 x 방향으로만 변화하는 꼭지점을 나타내고, \square 는 y 방향으로만 변화하는 꼭지점을 나타내며, \bullet 는 x, y 방향, \blacklozenge 는 x 와 z 방향으로 변화하는 꼭지점을 나타낸다. 그리고 \blacksquare 는 모든 방향으로 변화를 허용하였으며, \circ 는 주변 꼭지점들의 변화에 따라 이동하게 하였다. 선체의 중앙중단면에서 선체표면의 곡률이 선체의 좌현과 우현에 대하여 연속성을 유지하기 위하여 선수부의 처음과 두 번째 단면의 꼭지점들은 서로 동일한 x 좌표를 가지게 하였다. 즉, 첫 단면의 꼭지점은 x 방향으로도 변화하게 하고, 그 변화한 양만큼 두 번째 꼭지점도 변화하게 하였고, z 방향으

로도 동일한 양상으로 변화하게 하였다. 선미부를 구성하는 마지막 단면과 마지막 단면 이전의 단면에 대하여서도 선수부에서 사용한 방법과 동일한 방법을 사용하여 선미부의 중앙중단면에서 우현과 좌현에서의 선체표면 곡률의 연속성을 유지하고자 하였다.

5.3 제약조건의 설정

저항관점에서 최적선형을 구하기 위한 최적화과정 중 만족하여야할 제약조건으로 본 연구에서는 선체의 배수량(displacement)과 가로 수선면적 2차 관성모우멘트(waterplane transverse moment of inertia)가 초기의 기준선형의 값과 같아야 한다는 등식 제약조건을 부과하였다. 선체의 배수량은 저항성능을 결정하는 중요한 요소이고, 가로 수선면적 2차 관성모우멘트는 선체의 운동성능을 결정하는 중요한 요소이다. 즉, 가로 수선면적 2차 관성모우멘트를 등식조건으로 준 것은 최적화 과정 중 선체의 BM(metacentric radius)을 일정하게 유지하여 선체가 변형한 이후에도 유사한 복원성능을 가지도록 하고자 하는 의도에서 사용한 것이다.

선형의 최적화를 수행하는 과정에서 종종 선체가 안쪽으로 굽어지는 경우가 발생한다. 최적화과정 중 이 같은 비현실적인 선체형상의 생성을 방지하기 위하여 선체표면에서 유체 쪽으로 향하는 선체표면에서 법선벡터의 성분 중 y 방향의 성분은 0보다 크거나 같아야 한다는 부등식 제약조건을 부과하였으며, 식(9)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3은 선체표면에서의 법선벡터를 나타낸 것이다.

$$n_y \geq 0 \tag{9}$$

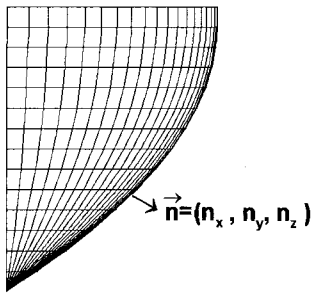


Fig. 3 Surface normal vector

5.4 수치해석

본 연구에서 세 가지 서로 다른 Fn에 대하여 선형 최적화 계산을 수행하였으며, 대상 선박은 앞에서 언급한 바와 같이 수정된 Wigley선형이다. 대상 Fn은 0.250, 0.316 그리고 0.408로 하였으며, 서로 상이한 Fn에 대하여 선형 최적화 수치계산을 수행함으로써 Wigley선형과 같은 단순선형의 Fn의 변화에 따른 최적선형으로의 진화의 양상 및 정도를 서로 비교 및 검토하고자 하였다.

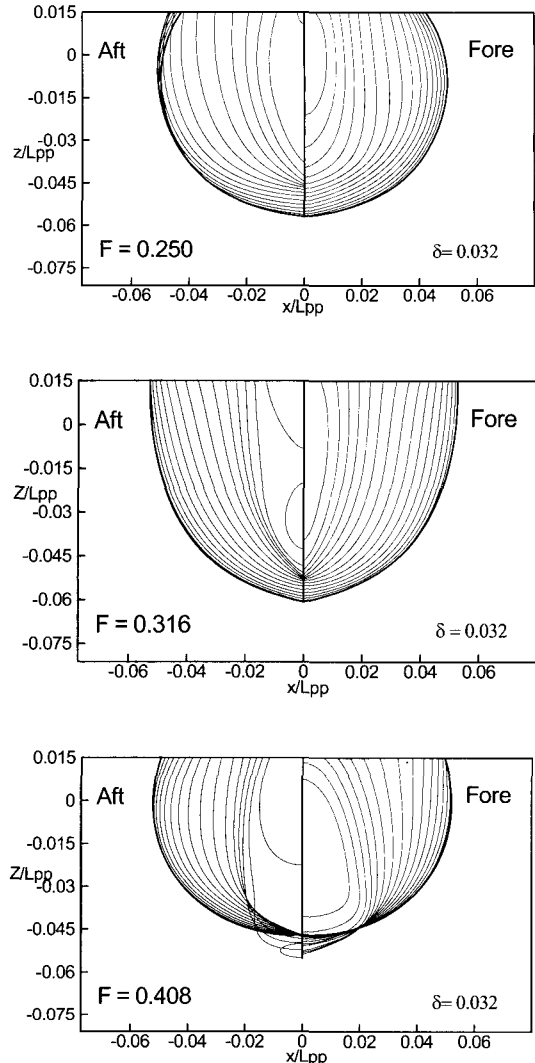


Fig. 4 Comparison of the optimized body plans for Fn= 0.250, 0.316 and 0.408

Fig. 4는 세 가지 서로 다른 Fn에 대하여 선형의 최적화를 수행하여 그 결과로서 얻어진 선박의 정면도를 서로 비교한 것이다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 서로 다른 Fn에 대하여 서로 다른 양상으로 선체가 진화한 것을 볼 수 있다. 선수부의 경우, 세 가지 경우 모두 선수벌브가 발생하는 방향으로 진화한 것을 볼 수 있다. 그리고 저속에 대하여 최적화를 수행한 경우에 비하여 고속에 대하여 최적화를 수행한 경우가 더 큰 벌브를 생성한다는 것을 알 수 있으며, 고속으로 가면서 벌브의 발생 위치가 선체의 상부에서 선체의 하부로 이동한다는 것을 알 수 있다. 선미부의 경우에도 세 가지 경우 모두 선미벌브가 발생하는 방향으로 진화한 것을 볼 수 있다. 저속에 대하여 최적화를 수행한 경우에 비하여 고속에 대하여 최적화를 수행한 경우가 더 선명하고 뚜렷한 선미 벌브를 발생하는 방향으로 선체가 진화해가는 것을 볼 수 있다.

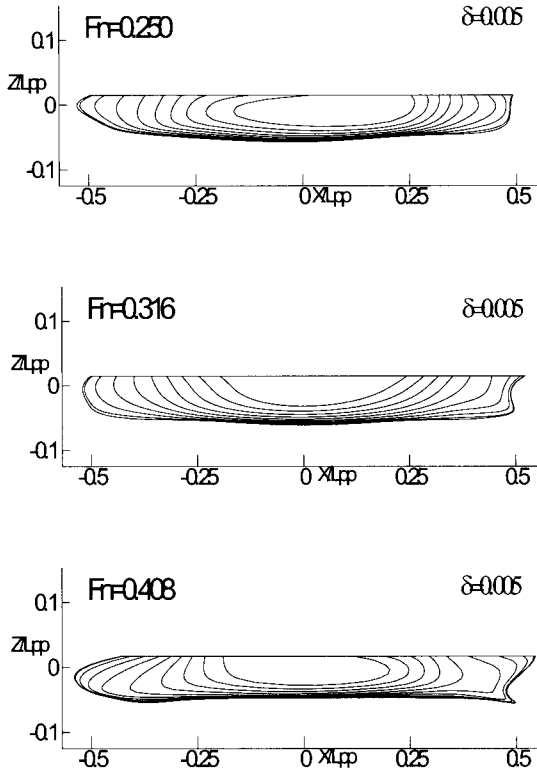


Fig. 5 Comparisons of the optimized buttocks of the hull for $F_n=0.250, 0.316$ and 0.408

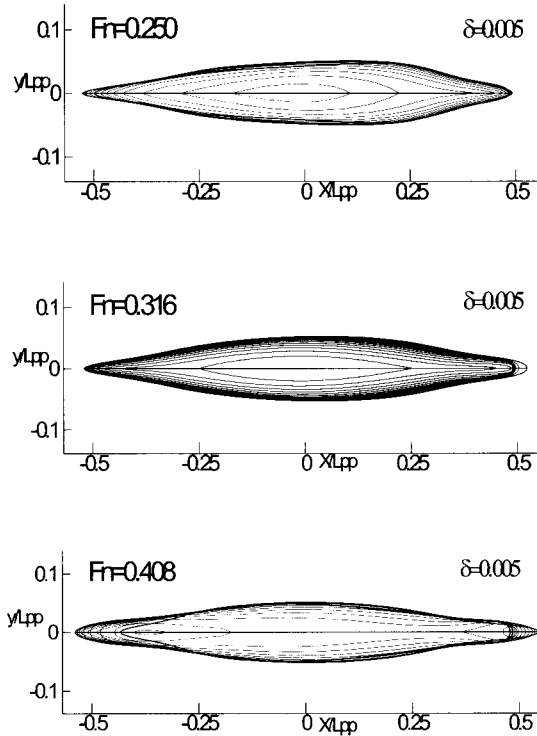


Fig. 6 Comparisons of the optimized waterlines for $F_n=0.250, 0.316$ and 0.408

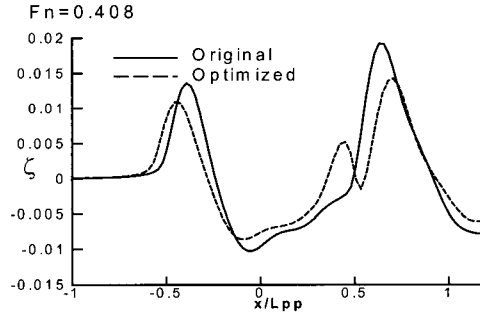
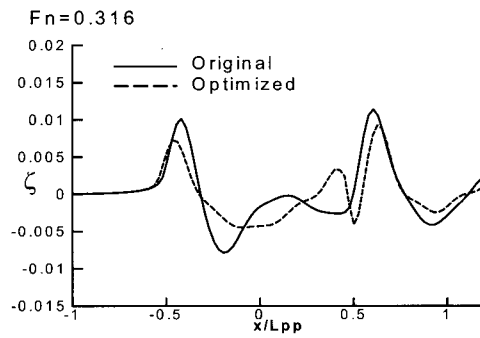
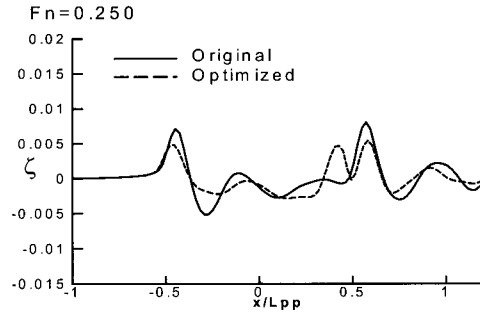


Fig. 7 Comparison of wave profiles for the initial hull and the optimized hull along the hull for $F_n=0.250, 0.316$ and 0.408

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 세 가지 서로 다른 F_n 에 대하여 최적화된 선형의 측면도와 반폭도를 서로 비교한 것이다. 선수부 및 선미부의 F_n 의 변화에 따른 최적선형으로의 변화양상을 더욱 뚜렷하게 볼 수 있다.

Fig. 7은 세 가지 서로 다른 F_n 에 대하여 초기선형의 선측파형과 최적선형의 선측파형을 서로 비교한 것이다. 세 가지 경우 모두 초기선형과 비교하여 선수파가 크게 줄어든 것을 볼 수 있으며, $F_n=0.408$ 에서는 선수 벌브의 발생으로 초기선형과 비교하여 최적선형에서 파가 빨리 발생한 것을 볼 수 있다. 선미부의 경우 특이하게 최적선형에서 두 개의 봉우리를 형성하면서 조파저항을 줄이는 방향으로 진화되어졌다는 것을 알 수 있다.

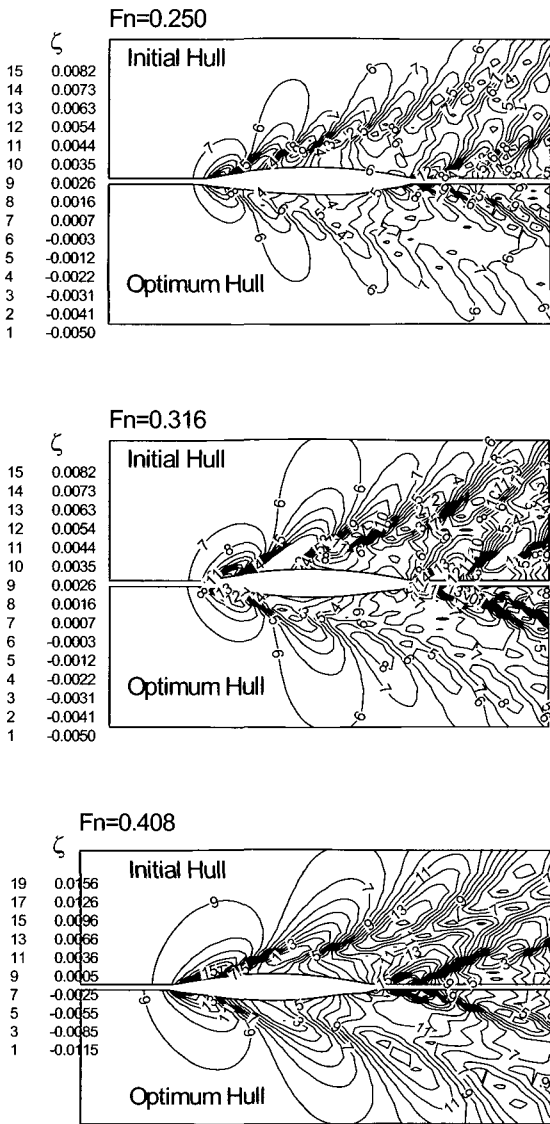


Fig. 8 Comparison of the wave pattern for the initial hull and the optimized hull for $F_n=0.250, 0.316$ and 0.408

Fig. 8은 각각 서로 다른 세 가지 F_n 에 대하여 초기선형에 의하여 유기된 자유수면에서의 파형과 최적선형에 의하여 유기된 자유수면에서의 파형을 서로 비교한 것이다. 세 가지 경우 모두 초기선형과 비교하여 최적선형에 의하여 유기된 파형이 전반적인 자유수면 영역에 걸쳐 크게 줄어든 것을 볼 수 있으며, 이 같은 현상은 선수부에서 더욱 명료하게 드러난다. 특히 선수의 어깨(shoulder)에서 발생한 파는 초기선형과 비교하여 최적선형에서 선수벌브의 존재로 인하여 두드러지게 줄어든 것을 볼 수 있다.

Table 1~3은 각각 서로 다른 세 가지 F_n 에 대하여 배수량, 침하표면적, 조파저항, 전저항 그리고 선수부에서의 선체의 침하량과 선미부에서의 침하량을 서로 비교한 것이다.

Table 1 Comparison of hydrostatic data and resistance for Wigley hull ($F_n=0.250$)

	Original	Optimum	Δ (%)
∇ (배수량)	0.002775	0.002863	2.74
S_{wet}	0.149100	0.133500	-10.46
R_{WM}	0.040900	0.005000	-87.48
R_{TM}	0.286400	0.225000	-21.46
침하(Bow)	-0.001249	-0.000721	
침하(Stern)	-0.001204	-0.001759	

Table 2 Comparison of hydrostatic data and resistance for Wigley hull ($F_n=0.316$)

	Original	Optimum	Δ (%)
∇ (배수량)	0.002775	0.002878	3.64
S_{wet}	0.149100	0.140100	-6.03
R_{WM}	0.116000	0.023100	-80.09
R_{TM}	0.488600	0.373400	-23.58
침하(Bow)	-0.002171	-0.001581	
침하(Stern)	-0.002179	-0.002495	

Table 3 Comparison of hydrostatic data and resistance for Wigley hull ($F_n=0.408$)

	Original	Optimum	Δ (%)
∇ (배수량)	0.002775	0.002851	2.74
S_{wet}	0.149100	0.143200	-6.03
R_{WM}	0.300000	0.090930	-71.16
R_{TM}	0.859300	0.655500	-27.40
침하(Bow)	0.000576	-0.004516	
침하(Stern)	-0.009699	-0.004531	

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 목적함수를 전저항으로 두었으며, 전저항을 구하기 위하여 식(4)와 (5)를 사용하였다. 식(5)에 포함된 형상계수는 Holtrop(1984)이 제안한 공식에 의하여 $(1+k)=1.057$ 로 두었다. Table 1~3에서 최적선형의 배수량이 초기선형의 배수량과 비교하여 2%~4%정도 증가한 것을 볼 수 있다. 이것은 본 연구에서 사용한 목적함수인 전저항을 최소화 하는 과정 중에서 조파저항 값이 양의 값에서 음의 값을 가지는 비현실적인 선형으로 변화를 하게 되는데, 본 연구에서는 이 경우 조파저항의 값이 양수를 가지면서 최소인 경우를 최적선형으로 간주하여 최적화 계산을 수행하였다. 세 가지 F_n 의 변화에 따른 초기선형과 최적선형에 대한 유동해석결과의 비교에서 최적선형이 초기선형과 비교하여 선체 배수량의 증가라는 불리한 조건에도 불구하고, 전저항과 조파저항이 크게 감소한 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구의 목적은 본 연구를 위하여 개발된 최소저항을 가지는 최적선형을 찾아내는 선형 최적화 프로그램을 초기 선형인 Wigley선형에 적용하여 선속의 변화에 따른 선체의 진화양상 및 진화정도를 파악하는 것이며, 이를 위하여 서로 다른 세 가지 F_n 에 대하여 최적화를 수행하였다. 선체에 미치는 전저항을 목적함수로 하고, 최적화 기법으로 SQP법을 사용하였다. 이에 대한 수치해석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안된 최적선형은 배수량의 증가에도 불구하고, 전저항과 조파저항이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있었다.
- (2) 세 가지 서로 다른 F_n 의 경우에 대한 최적화 수치해석 결과에 근거하여 높은 F_n 로 가면서 선수부에서는 선수벌브가 발생하고 선미부에서는 선미벌브가 발생하는 방향으로 선체가 진화해 나간다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 세 가지 서로 다른 F_n 의 경우에 대한 최적화 수치해석 결과에 근거하여 높은 F_n 에서 최적화된 선형은 비교적 낮은 F_n 에 대하여 최적화된 선형과 비교하여 선수벌브가 보다 더 비대하고 선미부에서는 보다 더 뚜렷하게 선미벌브가 발생하는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

김희정, 전호환 (1999). "비선형 최적화 기법을 이용한 2차원 지면효과익의 형상설계," 대한조선학회논문집, 제36권, 제3호, pp 50-59.

김희정, 전호환 (2000). "비선형 최적화 기법에 의한 최소 조파저항 선형 생성," 대한조선학회논문집, 제37권, 제4호, pp 11-18.

이광호, 전호환, 성장경 (1998). "정상파 문제의 방사조건에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 97-110.

최희중, 전호환 (2001). "트랜섬 선미를 가지는 선형의 포텐셜 유동해석," 한국해양공학회지, 제15권, 제1호, pp 1-6.

최희중, 전호환, 하동대 (2001). "트랜섬 선미를 가지는 선형의 비선형 포텐셜 유동해석," 대한조선학회 추계학술대회논문집, pp 195-198.

최희중, 서광철, 김방은, 전호환 (2003). "최소 조파저항을 가지는 컨테이너선의 선형최적화 기법에 대한 연구", 대한조선학회논문집, 제40권, 제4호, pp 8-15.

Daniele, P., Michele, R. and Emilio, F.C. (2001). "Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques", Journal of Ship Research, Vol 45, No 2, pp 140~149.

Day, A. H. and Doctors, L.J. (1997). "Resistance Optimization of Displacement Vessels on the Basis of Principal Parameters", Journal of Ship Research, Vol 41, No 4, Dec. 1997, pp 249-259.

Hendrix, D., Percival, S., and Noblesse, F. (2001). "Practical Hydrodynamic Optimization of a Monohull", SNAME Transactions, Vol 109, pp 173-183.

Hino, T., Kodama, Y. and Hirata, N. (1998). "Hydrodynamic Shape Optimization of Ship Hull Forms Using CFD", Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, Osaka, Japan, May 25-27, pp 533-541.

Holtrop, I.J. (1984). "A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data", International Ship-Building Progress, Vol 31, pp 272-276.

Janson, C., and Larsson, L. (1996). "A Method for the Optimization of Ship Hulls from Resistance Point of View", Proc. 21st Symp. Naval Hydrodynamics, pp 680-696.

Raven, H.C. (1996). A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem, Doctor's Thesis, Delft Univ. Techn., Delft, Netherlands.

Tahara, Y., Himeno, Y. and Tsukahara, T. (1998). "Application of Computational Fluid Dynamics to Tanker Hull Form Optimization Problem", Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, Osaka, Japan, May 25-27, pp 515-531.

Vanderplaats, G.N. (1984). Numerical Optimization Techniques for Engineering Designs, McGraw-Hill, New York.

2004년 4월 12일 원고 접수

2004년 5월 4일 최종 수정본 채택