

SQP법을 이용한 최적선형개발에 대한 연구

† 최희종* · 이경우** · 윤순동***

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, ** 목포해양대학교 해양시스템공학부

Study for the Development of an Optimum Hull Form using SQP

† Hee-Jong Choi* · Gyoung-Woo Lee** · Soon-Dong Yun**

* Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Yuseong-gu, Jang-dong, 171, Korea

** Division of Ocean System Engineering, MMU, Chukkyo-dong, 571-2, Korea

요약 : 본 연구에서는 최적화기법과 전산유체역학의 기술을 이용하여 저항의 관점에서 최적의 형상을 가지는 선형을 개발하는 알고리즘을 개발하였다. 최적화기법으로는 SQP(sequential quadratic programming)을 사용하였으며, 목적함수인 저항을 구하기 위하여 먼저 조파저항은 비선형자유수면경계조건을 고려한 선체주위 포텐셜유동을 계산할 수 있는 수치해석기법인 상 방향 페널이동법을 사용하였고, 선체에 미치는 전 저항을 구하기 위하여 ITTC 1957년 모형선-실선상관곡선을 이용하였다. 선형최적화 과정 중의 선체의 변경이나 계산 격자의 생성은 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)기법을 사용하여 구현하였다. 이와 같은 방법을 사용하여 개발된 선형최적화 기법의 타당성을 검증하기 위하여 선형이 비교적 잘 알려진 선형인 Wigley선형과 Series 60($C_B=0.6$)선형에 대하여 설계속도 $F_n=0.316$ 에서 선형최적화를 위한 수치해석을 수행하고 그 결과를 초기선형과 서로 비교하였다.

핵심어 : 선형최적화, SQP법, 포텐셜유동, Wigley 선형, Series 60($C_B=0.6$) 선형

Abstract : This paper presents the method for developing an optimum hull form with minimum wave resistance using SQP(sequential quadratic programming) as an optimization technique. The wave resistance is evaluated by a Rankine source panel method with non-linear free surface conditions and the ITTC 1957 friction line is used to predict the frictional resistance coefficient. The geometry of the hull surface is represented and modified using NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) surface patches. To verify the validity of the developed program the numerical calculations for Wigley hull and Series 60($C_B=0.6$) hull have been performed and the results obtained by the numerical calculations have been compared with the original hulls.

Key words : Hull-optimization, SQP(sequential quadratic programming), Potential flow, Wigley hull, Series 60($C_B=0.6$) hull

1. 서론

저항은 선형설계에 있어서 고려하여야 할 주요 요소이다. 최소저항을 갖는 최적 선형을 찾고자 하는 선박유체역학자들과 선형설계자들의 수세기에 걸친 실험적 경험과 공학적 직관으로 인하여 오늘날의 다소 복잡하지만 저항측면에서 효율적인 선형을 개발하게 되었으나, 이에 대한 수학적 공식화는 아직 이루어지지 못하고 있다. 선체저항을 지배하는 요소는 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 파계를 생성하는 선형을 개발할 수 있다는 것은 많은 실험과 관찰에서 알려져 있다. 정수 중을 일정속도로 항해하는 선박에 의하여 생성되는 파계는 선박의 형상, 특히 단면적 곡선, 수선면의 형상 및 횡단면의 형상 등에 많은 영향을 받는다.

선체에 미치는 저항의 예측은 대부분 예인수조에서 시행되는 모형선시험에 의존하게 되는데, 예측한 선형이 저항측면에서의 요구조건을 충족하지 못하는 경우, 새로운 모형선을 제작하여 다시 모형선시험을 수행하여야 한다. 그러나 최근에 CFD를 이용하여 선체주위의 유동해석 및 선체에 미치는 저항을 예측하고자 하는 연구가 컴퓨터 CPU속도의 기하학적 발전에 비례하여 급속도로 진척되고 있는 실정이며, 실제 선형의 설계에도 도입되어 사용되고 있다.

CFD기술의 발전은 수학적 최적화 기법과의 접목으로 최소저항을 가지는 최적선형 개발에 대한 길을 열어 놓았으며, 이와 관련하여 많은 연구논문이 발표되고 있다. 김성은(1991)은 기존선형에 Neumann-Kelvin이론을 사용하여 파형해석을 하고 미소변화량에는 박선이론을 적용하여 선체저항을 계산하고 최적화를 시행하였고, 김희정 등(1999)과 최희종 등(2003,2004)은 WIG선과 Series 60($C_B=0.6$)선형의 최적화에 빠른 수렴성과 유용성을 보여준 SQP법을 이용하였으며, Janson

† 교신저자 : 최희종, choihj1988@hanmail.net, 010-5509-0005

** 종신회원, kwlee@mmu.ac.kr, 011-9339-3589

*** 정회원, sdong@mmu.ac.kr, 061)240-7028

등(1996)은 Series 60 선형에 대한 선형의 최적화를 수행하였는데, 선수부분의 유동은 포텐셜 유동으로 가정하고, 선미부분의 유동은 점성유동으로 가정하여 목적함수인 저항을 구하고, 배수량을 제한조건으로 하여 최적화 계산을 수행하고 그 결과를 발표하였다. Daniele 등(2001)은 선체주위의 유동을 포텐셜 유동으로 가정하여 저항을 구하고, 여러 가지 최적화 기법을 사용하여 유조선의 선수부 벌브주위에 대한 선형의 최적화를 수행하였으며, 그 결과를 실험값과 비교하였다. Hino 등(1998), Tahara 등(1998)은 최적화기법인 SQP와 선체주위의 유동을 점성유동으로 가정하여 선형의 최적화를 수행하였다.

본 연구는 목적은 최소 조파저항을 가지는 최적선형을 생성하는 기법을 개발하는 것이다. 목적함수인 선체저항을 구하기 위하여 포텐셜유동해석기법인 상 방향 패널이동법을 이용하여 조파저항을 구하였으며, 선체에 미치는 마찰저항성분은 ITTC 1957년 실선-모형선 상관공식을 이용하여 구하였다. 그리고 최적화 기법으로는 비선형 계획법의 하나인 SQP법을 사용하였으며, 선체표면의 표현과 변경은 NURBS곡면 패치를 사용하여 나타내었다. 개발된 선형최적화 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 선형이 잘 알려져 있는 선형인 Wigley선형과 Series 60($C_B=0.6$)선형에 대한 선형최적화 수치해석을 수행하고 그 결과를 초기선형과 서로 비교하였다.

2. 최적화 알고리즘

최적화 문제에 대한 일반식은 다음과 같다.

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, x 는 설계변수, f 는 목적함수 그리고, g 는 제약조건을 나타내며, x_l 과 x_u 는 각각 설계변수의 하한과 상한을 나타낸다. 그리고 m 는 제약조건의 수를 나타내고, m_e 는 제약조건 중 등식 제약조건의 수를 나타낸다.

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 부문제를 얻는다. 근사 부문제를 탐색방향인 d 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

비선형 계획 알고리즘

$$\text{minimize} \quad \frac{1}{2} d^T B d + \nabla f(x)^T d \quad (2)$$

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

위의 식에서 B 는 라그랑지(Lagrange)의 헷세행렬(Hessian matrix)을 나타낸다.

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(Vanderplaats 1984).

본 연구에서 위에서 언급한 비선형 계획 알고리즘을 모형선에 적용할 때 최초의 이동거리 값을 $1.0^{-4} L_{pp}$ 로 두었다.

3. 목적함수의 계산

목적함수(objective function)인 저항은 조파저항성분과 마찰저항성분으로 분리하여 구하였다.

조파저항의 계산

선체주위의 유동이 비점성, 포텐셜 유동이라는 가정과 자유수면 경계조건의 비선형성을 고려한 렌킨소오스 패널법에 의해 선체주위의 유동을 계산하고 선체표면에서의 속도성분을 구하였다. 베르누이의 정리를 이용하여 선체표면에서의 압력 계수를 구한 다음, 압력계수(C_p)을 선체표면에 걸쳐서 적분하여 선체에 미치는 조파저항을 계산하였다(Raven, 1996; 김 등, 2000; 최 등, 2001).

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

위의 식에서 S 는 침수표면적을 나타내고, n_x 는 선체표면에서의 법선벡터의 x 방향의 성분을 나타낸다.

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 레이놀즈수(Reynold's number)를 나타낸다.

전 저항의 계산

전 저항은 선체주위의 유동이 박리가 발생하지 않는다는 가정 하에 Hughes의 3차원 법을 이용하여 구하였다.

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

위의 식에서 ρ 는 물의 밀도, U 는 선체의 진행속도, 그리고 $(1+k)$ 는 형상계수(form factor)를 나타내며, 형상계수를 구하기 위하여 Holtrop(1984)이 발표한 식을 사용하였다.

4. 선체의 변형

변화된 선형에 대한 저항추정을 위하여 유동 수치해석을 위한 계산 격자계를 생성하여야 하며, 생성된 선체형상은 특별한 제약이 없다면 불연속점이나 불연속선이 없이 선체 전반에 걸쳐 부드럽되어야 한다. 보통 선형 최적화 문제에서는 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 채택한 계산격자생성을 위한 선형의 곡면은 B-spline을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

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

위의 식에서 $B_i^3(u)$ 와 $B_j^3(v)$ 는 3차의 기저함수를 나타내고, 계수 $c_{i,j}$ 는 B-spline 꼭짓점(control vertices)이며, N_u 와 N_v 는 각각 u 와 v 방향의 B-spline 꼭짓점의 개수이다.

본 연구에서는 $c_{i,j}$ 를 설계변수로 두고 최적계산을 수행하였다. $c_{i,j}$ 의 초기값은 주어진 초기선형에 대하여 B-spline surface fitting을 하여 구하였다.

5. 수치해석결과

본 연구를 위하여 개발된 선형최적화 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 이미 선형이 잘 알려져 있으며 개발된 수치해석 프로그램의 검증용으로 자주 언급되는 선형인 Wigley선형과 Series 60($C_B=0.6$)선형에 대한 선형최적화 수치해석을 수행하였다.

Wigley선형은 Series 60($C_B=0.6$)선형과 비교하여 비교적 세장선이므로 선체주위의 유장이 포텐셜유동에 보다 근접하다고 할 수 있다. 반면 Series 60($C_B=0.6$)선형의 경우에는 선수부를 제외한 선수부 이후의 선체의 형상은 비교적 컨테이너선과 유사한 형상을 가지고 있다. 그러므로 선수부의 유동은 포텐셜유동을 따르지만 선수부 어깨를 지나면서 난류유동에 가깝다는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서 채택한 포텐셜유동의 가정을 따라서 전 선체에 걸쳐서 선형최적화를 수행하는 것은 문제를 발생시킬 여지를 가지고 있다고 하겠다. 그러므로 본 연구에서는 Wigley선형에 대한 선형최적화의 경우, 선체 전

영역에 걸쳐서 선형최적화를 수행하였으며, Series 60($C_B=0.6$) 선형의 경우 선수부에서 선미부 방향으로 일정영역에 대하여서만 선형최적화를 수행하였다.

5.1 Wigley 선형

1) 초기선형의 선정

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

$$y = (1-4x^2)(1-256z^2)/20 \quad \text{at } z \leq 0 \quad (7)$$

$$y = (1-4x^2)/20 \quad \text{at } z > 0$$

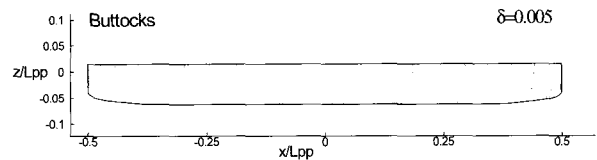
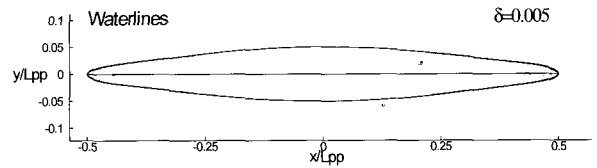
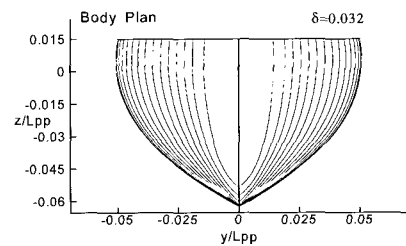


Fig. 1 Lines for the Modified Wigley hull taken as initial hull in the optimization

본 연구에서는 선체주위의 유동계산을 위하여 비선형 자유수면 경계조건을 고려하였고, 이 경우 비선형 자유수면 경계조건을 만족하기 위한 반복계산 시 선축파형을 고려하여 선체 표면의 격자계를 생성하기 때문에 교란되지 않은 자유수면 위의 부분에 대하여서도 선체형상을 정의하여야 한다. 본 연구에서는 교란되지 않은 자유수면 위의 부분에 대한 선체표면의 정의를 하기 위하여 $z=0$ 에서의 선체 정의 식을 그대로 확장하여 자유수면 위의 선체를 표현하였다.

Fig. 1은 초기선형으로 사용된 수정된 Wigley 선형의 정면도, 수선면 그리고 측면도를 나타낸다. $y=0$ 인 단면에 대하여 선체 표면의 곡률의 연속성을 유지하도록 선체의 표면을 수정하였으며, 초기 선형으로 위에서 수학적으로 정의한 Wigley 선형을 대신해 최적화 과정 중에 사용하기 위해 B-spline 곡면 fitting을 하여 실질적으로 선수와 선미 부분을 라운드가 되도록 약간 수정된 정면도, 수선면 그리고 측면도를 보여주고 있

다. 여기서 δ 는 컨투어 간격(contour interval)을 나타낸다.

2) 설계변수의 선정

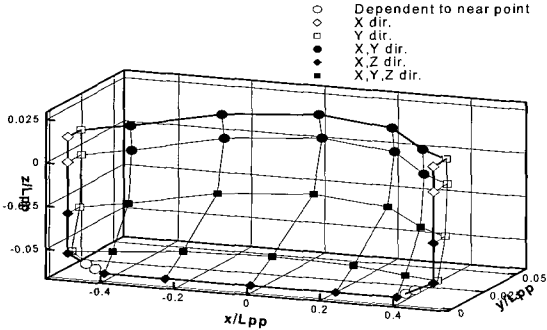


Fig. 2 Design variables for Wigley hull taken as initial hull in the optimization

Wigley선형에 대한 설계변수는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 선체의 표면을 B-spline surface fitting을 하여 선형변경을 위한 5×9 (9개 섹션에 각각 5개의 꼭짓점)의 꼭짓점 망(control vertices network)을 배의 선형 형태를 나타내기 위해 사용하였으며 $y=0$ 의 중앙평면에 대하여 대칭이라고 가정하여 이를 설계변수로 두었다. 자유수면 위 부분의 꼭짓점들과 아랫부분의 꼭짓점들은 최적화 과정 중에 배가 적절한 형상을 갖도록 하기위해서 다음과 같은 설계변수들이 움직일 수 있는 허용 방향을 부과하였으며 Fig. 2에 묘사하였다. \diamond 는 x 방향으로만 변화하는 꼭짓점을 나타내고, \square 는 y 방향으로만 변화하는 꼭짓점을 나타내었으며, \bullet 는 x 와 y 방향, \blacklozenge 는 x 와 z 방향으로의 변화하는 꼭짓점을 나타낸다. 그리고 \blacksquare 는 모든 방향으로의 변화를 허용하였으며, \circ 는 주변 꼭짓점들의 변화에 따라 이동하게 하였다. 선수부의 처음과 두 번째 섹션, 선미부의 처음과 두 번째 섹션은 최적화 과정 중 꼭짓점들이 똑 같은 x 좌표의 값을 갖도록 하여 선수 선미부의 형상이 부드럽게 형성될 수 있도록 하였다.

각 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음과 같다.

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

3) 제약조건의 설정

최소저항을 가지는 최적선형을 구하기 위한 최적화과정 중에 만족하여야 할 제한조건으로 최적화 과정중의 선체의 배수량과 가로 수선면적 2차 관성모우멘트(waterplane transverse moment of inertia)가 초기선형의 값과 같아야 한다는 등식 제약조건을 부과하였다. 이는 선체가 최적화 과정 중 BM값을 일정하게 하여 선체가 항상 중성 평형 상태에 놓이도록 하였다. 또한 최적화과정 중에 선형표면형상이 안쪽으로 굽어지는

현상을 방지하기 위하여 선체표면에 대한 법선 벡터의 성분 중 y 방향의 성분은 0보다 크거나 같아야 한다는 부등식 제약 조건을 부과하였으며, 그에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$n_y \geq 0 \quad (9)$$

Fig. 3은 식(9)에 대한 도식화를 한 것이다.

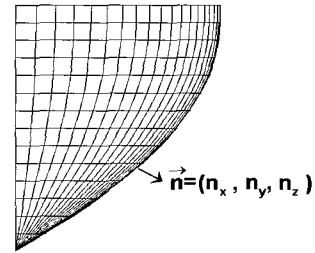
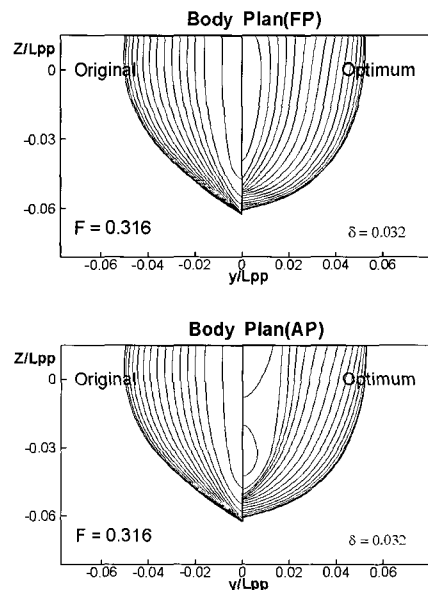


Fig. 3 Constraint condition

4) 수치해석결과

수정된 Wigley선형에 대하여 설계속도 $F_n=0.316$ 에서 선체의 자유수면에 대한 가로 수선면에 대한 2차 관성모우멘트와 배수량을 고정하고 선체 전 영역에 대하여 선체의 형상을 바꾸어 가면서 최소저항의 관점에서 선형의 최적화를 수행하였다.

Fig. 4는 선형최적화 결과로서 도출된 최적선의 선도를 초기선형의 선도와 비교한 것이다. 초기선형과 비교하여 최적선형에서는 선수부의 경우에 벌브가 발생하는 방향으로 선체가 진화한 것을 볼 수 있으며, 선미부의 경우 선미벌브와 오버행(overhang)이 생기는 방향으로 선체가 진화해 나가는 것을 알 수 있다. 초기의 2차의 수학식에 의하여 정의된 단순선박은 선형의 최적화가 진행되면서 실제 선형에 보다 가까운 선박으로 진화한다는 것을 목격할 수 있었다.



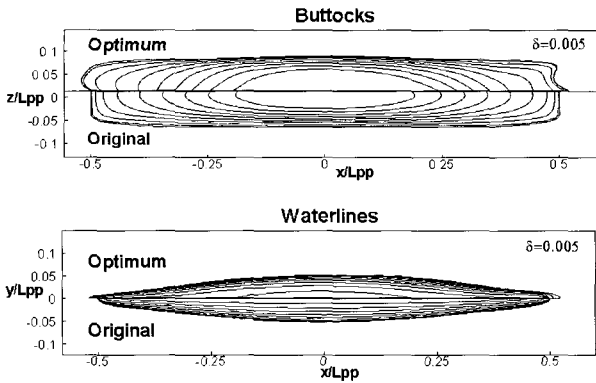


Fig. 4 Lines for optimized hull at Fn=0.316

Table 1 Comparison of hydrostatic and hydrodynamic data for the initial hull and the optimized hull optimized at Fn=0.316

	Original	Optimum	Δ (%)
∇ (배수량)	0.002775	0.002878	3.64
S_{wet}	0.1491	0.1401	-6.03
R_{WM}	0.1160	0.0231	-80.09
R_{TM}	0.4886	0.3734	-23.58
침하(Bow)	-0.002171	-0.00158	
침하(Stern)	-0.002179	-0.00249	

Fig. 5와 Fig. 6은 파형과 선측에서의 파고를 초기선형과 최적선형에 대하여 서로 비교한 것이다. 초기선형과 비교하여 최적선형에서는 어깨에서 출발한 파가 초기선형에 의하여 유기된 파와 비교하여 크게 줄어든 것을 알 수 있다.

Table 1은 초기선형과 최적선형의 동역학적/정역학적 특성을 나타낸 것이다. 초기선형과 비교하여 최적선형에서는 조파저항인 약 80%가량 줄어들었으며, 전 저항인 23%가량 줄어든 것을 알 수 있다.

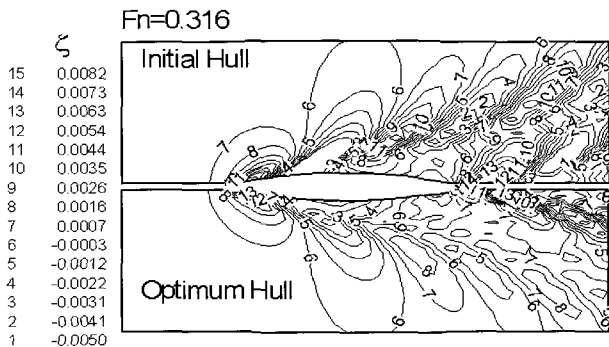


Fig. 5 Comparison of wave patterns induced by the initial hull and the optimized hull optimized at Fn=0.316

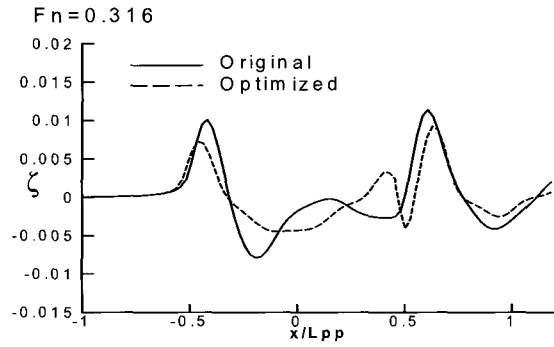


Fig. 6 Comparison of wave profiles along the hull for the initial hull and the optimized hull optimized at Fn=0.316

5.2 Series 60($C_B=0.6$) 선형

1) 설계변수의 선정

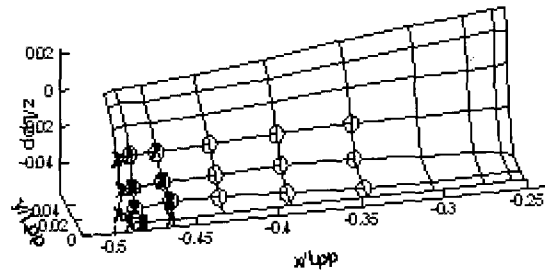


Fig. 7 Design Variables for Series 60 Hull

Series 60($C_B=0.6$)선형에 대한 설계변수는 Fig. 7에 보는 바와 같이 선수에서 25%까지의 초기선형에 B-spline surface fitting을 하여 선형변경을 위한 B-spline 꼭짓점을 만들었다.

Fig. 7에서 O으로 표시된 좌표는 y방향으로 변화를 허용하는 설계변수를 나타내고, X로 표시된 좌표는 x와 z방향으로 변화를 허용하는 꼭짓점을 나타낸다.

선박설계에 있어서 중요한 고려사항인 수선면의 면적을 유지하기 위하여 자유수면 아래에 있는 꼭짓점만을 설계변수로 잡았으며, 선형을 고정된 선미부와의 연속성을 주기 위하여 x방향으로 6번째 이후의 꼭짓점을 고정하였다.

각 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 -0.5300 < x/Lpp < -0.480 \\
 0.000 < y/Lpp < 0.050 \\
 -0.0535 < z/Lpp < 0.000
 \end{aligned} \tag{7}$$

위의 식에서 Lpp 는 수선간 길이(length between perpendiculars)를 나타낸다.

2) 제한조건의 설정

초기선형과 최적선형에 대하여 목적함수인 저항값을 비교

하기 위하여 배수량을 고정하는 것이 일반적이지만, Series 60($C_B=0.6$)선형의 경우, 배수량을 고정할 경우 선형의 변화가 매우 미소해서 배수량은 초기선형보다 커야 한다는 조건을 주었다. 그러나 배수량의 조건만을 주어서 최적화 계산을 수행하였을 때, 선수 어깨 부근에서 선형이 움푹 들어가는 현상을 볼 수 있었다. 이 같은 현상은 최적선형의 원하는 방향으로의 진화를 방해하는 요인이므로, 이 같은 현상을 방지하기 위하여 다음의 조건을 부가하였다.

$$0 \leq \theta \leq 90^\circ \quad (8)$$

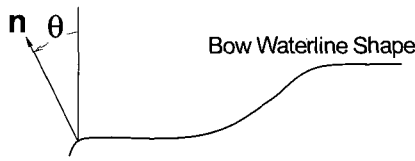


Fig. 8 Definition of θ

Fig. 8에서 n 은 선체표면에 대한 법선벡터를 나타내고, θ 는 법선벡터와 선체의 횡단면이 이루는 각을 나타낸다.

3) 수치해석결과

$Fn=0.316$ 에 대하여 유동계산을 수행하였다. 비선형 자유수면경계조건을 고려하였고, 선체 자세의 트림과 침하는 고려하지 않았다.

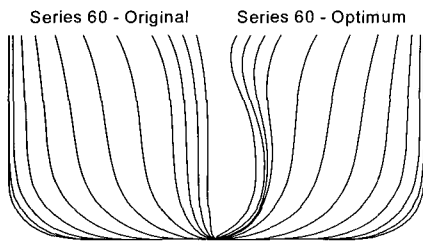


Fig. 9 Comparison of Body Plan

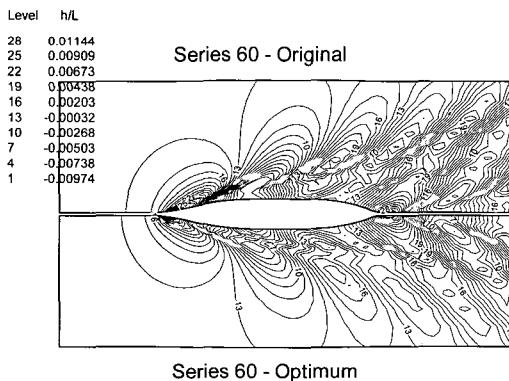


Fig. 10 Comparison of Wave Contour

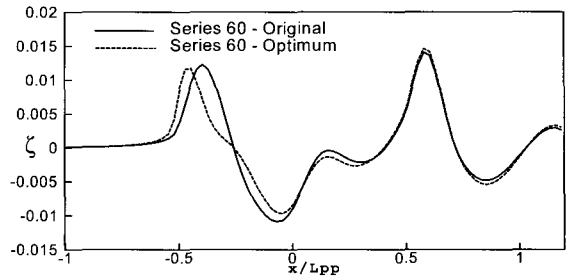


Fig. 11 Comparison of Wave Profile

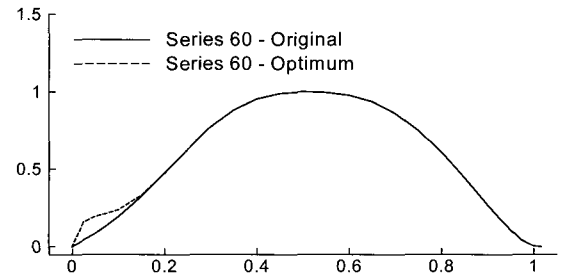


Fig. 12 Comparison of C_p Curve

Fig. 9는 초기선형인 Series 60($C_B=0.6$)선형과 그에 대한 최적선형의 선수부에 대한 정면도(Body plan)를 서로 비교한 것이다. 최적선형에서 벌브의 발생을 목격할 수 있다. 선체가 비교적 부드럽게 진화되었으며, 각각 스테이션에서의 선평이 선미 쪽으로 갈수록 증가하는 것에서 최적화 계산이 식(8)의 제한조건을 충실히 이행하는 것을 알 수 있다. 그리고 자유수면에서의 수선(Waterline)이 초기선형과 최적선형을 비교하여 다소 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10는 파형을 서로 비교한 것으로, 초기선형과 비교하여 어깨(shoulder)에서 발생한 파가 최적선형에서는 벌브에서 발생한 파도로 인하여 파고가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11는 선측파형을 비교한 것이다. 초기선형과 비교하여 최적선형에서는 벌브의 존재로 파가 빨리 발생하는 것을 볼 수 있으나, 초기선형에서 발생하는 선수근처의 파가 최적선형에서는 벌브의 영향으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 초기선형과 최적선형의 단면적곡선을 서로 비교한 것이다. 초기선형과 비교하여 최적선형의 선수부에서 벌브의 존재로 C_p 의 값들이 증가한 것을 볼 수 있다.

Table 2 Comparison of hydrostatic and hydrodynamic data

	Original	Optimum	$\Delta(\%)$
C_B	0.5976	0.6073	+1.6230
S_{wet}	0.1706	0.1719	+0.7620
R_{WM}	0.1324	0.0935	-29.3810
R_{TM}	0.5477	0.5117	-6.5730

Table 2는 초기선형과 최적선형의 유체 정역학적 특성치인 배수량과 침수표면적, 그리고, 유체동역학적 특성치인 조파저항과 전 저항을 서로 비교한 것이다.

전 저항을 구하기 위하여 앞에서 언급한 바와 같이 Hughes의 3차원 법을 사용하였으며, 전 저항 계산에 필요한 Series 60 선형에 대한 형상계수(1+k)는 1.029가 된다. 배수량과 침수표면적은 초기선형과 비교하여 다소 증가한 것을 볼 수 있다. 그러나 이 같은 불리한 조건에도 불구하고, 전 저항은 6.57%가 줄고, 조파저항은 29.38%가 줄었다는 것은 선수 벌브의 존재가 얼마나 유용한 저항의 감소요소인지를 단적으로 보여준다.

6. 결 론

최적화기법과 포텐셜유동해석기법을 접목하여 저항관점에서 최적선형을 개발하는 기법을 개발하고, 그 타당성을 검증하기 위하여 Wigley선형과 Series 60($C_B=0.6$)선형에 대하여 설계속도 $F_n=0.316$ 에서 수치해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 배수량이나, 침수표면적의 증가에도 불구하고, 전 저항이나 조파저항이 크게 줄어드는 것을 알 수 있었다.
- 2) Wigley선형의 경우 선형최적화가 수행되면서 단순 수학적 선형이 실제 건조하는 선박에 가까워지는 형상을 가지는 방향으로 선체가 진화한다는 것을 알 수 있었다.
- 3) Series 60($C_B=0.6$)선형의 경우 선수부에 대하여서만 최적화를 수행하였는데 선형최적화가 수행되면서 선수벌브가 크게 발달하는 방향으로 선체가 진화한다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 김성은(1991), "최소조파 저항성능을 갖는 최적 선수형상에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제28권 제2호, pp.28-39.
 [2] 김희정, 전호환(1999), "비선형 최적화 기법을 이용한 2차원 지면효과익의 형상설계", 대한조선학회 논문집, 제36권 제3호, pp.50-59.
 [3] 김도현, 김우진, 반석호(2000), "패널법을 이용한 일반 상선의 비선형조파문제 해석", 대한조선학회 논문집, 제37권 제4호, pp. 1-10.

[4] 최희종, 전호환, 하동대(2001), "트랜섭 선미를 가지는 선형의 비선형 포텐셜 유동해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 195-198.
 [5] 최희종, 서광철, 김방은, 전호환(2003), "최소조파저항을 가지는 컨테이너선의 선형최적화 기법에 대한 연구", 대한조선학회논문집, 제40권, 제4호, pp.8-15.
 [6] 최희종, 전호환, 정석호(2004), "최적선형개발에 대한 기초연구", 한국해양공학회지 제18권 제3호, pp.32-39.
 [7] 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.
 [8] 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.
 [9] Holtrop, I. J.(1984), "A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data", International Ship-Building Progress, Vol. 31. pp.272~276.
 [10] 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.
 [11] Raven, H. C.(1996), "A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem", Doctor's Thesis, Delft Univ. Techn., Delft, Netherlands.
 [12] Tahara, Y., Himeno, Y., and Tsukahara, T(1998), "An 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.
 [13] Vanderplaats, G. N.(1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Designs", McGraw-Hill, New York.

원고접수일 : 2005년 4월 6일

원고채택일 : 2006년 12월 19일