

# 고속 Ro-Pax선형의 조파저항성능 향상을 위한 최적 선형설계에 관한 연구

박동우\* · † 최희종

\* 현대중공업 선박연구소, † 전남대학교 조선해양공학과 교수

## Study for Optimal Hull Form Design of a High Speed Ro-Pax Ship on Wave-making Resistance Performance

Dong-Woo Park\* · † Hee-Jong Choi

\* Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Institute, Ulsan 682-792, Korea

† Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

**요 약** : 최적화기법과 선형변환 자동화기법을 도입하여 고속 중형 Ro-Pax선박의 조파저항성능을 향상시킬 수 있는 선형설계방법에 대하여 연구하였다. 최적화기법으로는 SQP(sequential quadratic programming)을 적용하였으며, 선형변환 자동화기법으로는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)기법을 적용하였다. 목적함수인 선박의 조파저항성능을 예측하기 위하여 비선형 자유수면 경계조건과 선체의 침하량을 고려한 비점성 유동 해석 기법인 패널법을 적용하였다. 기준선형에 대하여 선형최적화를 수행하였으며 그 결과로 도출된 최적선형에 대하여 모형선을 제작하여 모형시험을 수행하였다. 기준선형과 최적선형에 대한 수치해석을 수행하여 얻은 결과와 최적선형에 대한 모형시험을 수행하여 얻은 결과를 서로 비교하였다.

**핵심용어** : 선형최적화기법, Ro-Pax선박, SQP법, 패널법, NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)기법

**Abstract** : A hull form design technique to enhance the wave-making resistance performance for a medium size high speed Ro-Pax ship was studied introducing an optimization method and an automatic hull form modification method. SQP(sequential quadratic programming) was applied as the optimization algorithm and the geometry of hull surface was represented and modified using the NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline). The wave-making resistance performance as an objective function in the optimization procedure was evaluated using the Rankine source panel method in which nonlinearity of the free surface boundary conditions and the trim and sinkage of the ship was fully taken into account. Using the Ro-Pax ship as a base hull, the hull-form optimization method was applied to obtain the hull shape that produced the lower wave-making resistance. To verify the validity of the hull-form optimization method, the numerical results was compared with the model test results.

**Key words** : hull-form optimization method, Ro-Pax ship, SQP(sequential quadratic programming) algorithm, Rankine source panel method, NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)

## 1. 서 론

최근에는 정부의 지원 아래 중국의 조선업이 크게 발전하고 있으며, 우리나라와 중국 조선소와의 기술 격차는 줄어들고 있다. 우리나라 조선업이 세계시장에서 중국을 계속 견제하려면 생산성 제고와 함께 기술력 우위 전략을 추진해야 한다. 이러한 전략의 핵심이 고부가가치선에 집중하는 것이고, 대안 가운데 하나가 가장 부가가치가 높다고 평가되는 크루즈선 건조사업에 성공적으로 진출하는 것이다.

화물·승객 겸용 운반선인 Ro-Pax선과 같은 여객선은 크루즈선의 전단계로 여객중심의 호화로운 크루즈선과는 많은 차이가 있지만, 이를 기반으로 한 크루즈선 기술개발은 매우

중요한 부분을 차지한다.

대형 여객선의 선형개발은 고속의 설계속도, 엄격한 복원성능의 요구, 복잡한 부가물 설계 등의 문제를 포함하여, 개발에 세심한 주의가 요구된다. 그리고 운항항로 및 항만설비에 따른 선주의 다양한 선형요구와 이에 대한 유사 실적선의 자료 부족으로 선형의 최적화 과정이 설계과정에서 필수적이다.

일반적으로, 여객선의 개발은 선주의 다양한 요구로 인하여 표준선 개념의 도입이 어렵다. 따라서 선박의 제반성능을 결정하는 주요제원은 초기 선형에서부터 충분한 주의를 기울여 결정해야 한다. 여객선의 선형개발은 결정된 주요제원을 바탕으로 유사 실적선을 조사하고, 주요제원 및 제반성능이 가장 유사한 선형을 선택하여 모선(parent ship)을 선정한다. 모선

† 교신저자 : 정희원, choihj@jnu.ac.kr 061)659-7154

\* 정희원, dwpark03@naver.com 010-6522-0265

의 선형의 요구조건에 맞도록 선형변환이 되며, 선형계수 및 선형특성을 고려하여 초기선형을 개발한다. 한편 초기 개발선형이 최적의 성능을 갖는다는 보장이 없으므로, 여객선의 선형개발은 CFD 계산 또는 모형시험을 통하여 제반성능을 확인하고, 그 결과에 따라 선형최적화 및 부가물최적화를 수행하여 선형을 최적화할 필요가 있다(장 등, 2003).

선형최적화에 관한 연구는 최근 컴퓨터 데이터 처리속도의 급속한 향상으로 인하여 CFD 계산기법, 최적화기법 그리고 선형변환 자동화기법을 접목한 많은 연구가 이루어지고 있다(최 등, 2006; Choi et al., 2005; Zhang, 2009; Zhang, 2012).

본 연구에서는 최적화기법과 선형변환 자동화기법을 도입하여 고속 중형 Ro-Pax선박의 조파저항성능을 향상시킬 수 있는 선형설계방법에 대하여 연구하였다. 최적화기법으로는 SQP(sequential quadratic programming)을 적용하였으며, 선형변환 자동화기법으로는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)기법을 적용하였다. 목적함수인 선박의 조파저항성능을 예측하기 위하여 비선형 자유수면 경계조건과 선체의 침하량을 고려한 비점성 유동 해석 기법인 패널법을 적용하였다. 기준선형에 대하여 선형최적화를 수행하였으며 그 결과로 도출된 최적선형에 대하여 모형선을 제작하여 모형시험을 수행하였다. 기준선형과 최적선형에 대한 수치해석을 수행하여 얻은 결과와 최적선형에 대한 모형시험을 수행하여 얻은 결과를 서로 비교하였다.

## 2. 최적화 알고리즘

최적화 문제에 대한 일반식은 다음과 같다.

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

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 Taylor전개하고, 목적함수는 이차식으로 제약조건은 일차식으로 근사하여 근사 부문제를 얻는다. 근사 부문제를 탐색방향인  $d$ 에 대하여 정리하면 다음식에 의하여 표현된다(Vanderplaats, 1984).

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

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

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

## 3. 목적함수

본 연구에서는 목적함수인 조파저항계수를 구하기 위하여 포텐셜 유동 해석 기법인 Rankine 소오스 패널법을 사용하였으며, 최적화 과정 중 선형을 변경하였을 때 발생할 수 있는 선체표면을 정의하는 격자 생성의 문제를 해결하기 위하여 패널절단법을 적용하였다.

### 3.1 조파저항계수의 계산

유체의 성질이 비점성, 비압축성이라고 가정하고 유동의 비회전성을 가정하면 속도포텐셜( $\phi$ )이 존재하며 유동장 내에서 지배방정식인 라플라스 방정식(Laplace equation)과 경계면에서 경계조건식을 부과함으로써 구할 수 있다.

지배방정식인 라플라스 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \text{ in fluid domain} \quad (3)$$

선체표면의 경계에서는 유체입자가 선체표면을 관통하여 흐를 수 없다는 비 침투 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} &\nabla \phi \cdot \vec{n} = 0 \text{ on hull} && (4) \\ &\vec{n} : \text{유동장으로 향하는 선체표면의 법선벡터(normal vector)} \end{aligned}$$

자유수면에서는 유체입자가 자유수면을 떠날 수 없으며 자유수면과 같이 움직여야 한다는 운동학적 자유수면 경계조건식(kinematic free surface boundary condition)을 만족시켜야 한다.

$$\begin{aligned} &\phi_x h_x + \phi_y h_y - \phi_z = 0 \text{ on free surface} && (5) \\ &h : \text{파고(wave height)} \end{aligned}$$

운동학적 자유수면 경계조건식과 더불어 자유수면에서 만족하여야 할 또 다른 경계조건으로 자유수면에서의 압력이 대기압과 같아야 한다는 동역학적 자유수면 경계조건식(dynamic free surface boundary condition)을 만족시켜야 한다.

$$h + \frac{1}{2}Fn^2(\nabla \phi \cdot \nabla \phi - 1) = 0 \text{ on free surface} \quad (6)$$

선수부에서 상류방향으로 어느 정도 떨어진 자유수면 영역에서는 선체의 존재에 의하여 발생된 파가 없어야 한다는 조건인 방사조건을 만족시켜야 한다.

$$\nabla\phi = (1, 0, 0) \text{ at } x = -\infty \quad (7)$$

라플라스 방정식과 경계조건식 그리고 랭킨소오스 패널법을 사용하여 경계면에서의 속도포텐셜을 구한 후 속도포텐셜을 미분하여 경계면에서의 유동의 속도를 구한다. 베르누이 방정식(Bernoulli's equation)을 사용하여 경계면에서의 압력계수를 구한 다음, 선체표면에 걸쳐서 압력계수를 적분하여 선체에 미치는 조파저항계수를 계산하였다.

$$C_w = -\frac{\int_S C_p n_x ds}{S} \quad (8)$$

위의 식에서  $S$  는 침수표면적을 나타내고,  $n_x$  는 선체표면에서의 법선벡터의  $x$  방향의 성분을 나타낸다(Raven, 1996).

### 3.2 패널절단법

패널법을 사용하여 선체주위의 유동해석을 수행하기 위해서는 자유수면 아래의 선체표면을 정의하는 패널을 생성하여야 한다. 비선형 자유수면 경계조건식을 만족시키기 위하여서는 비선형 자유수면 경계조건식을 선형화한 후, 반복 계산을 수행하여 비선형 자유수면 경계조건식을 만족시키게 되는데 이때 각 반복 계산 단계에서 이전에 계산된 선측파고를 따라서 선체표면을 정의하는 패널을 다시 생성해주어야 한다.

패널절단법(Panel cutting method)은 초기에 주어진 패널의 형상을 최대한 유지하면서 선체표면을 정의하는 패널과 선측파고의 상태만을 검토하여 패널을 생성하는 방법이다. 패널절단법을 사용하여 패널을 재생성하는 방법은 아래와 같다.

- 1) 초기에 주어진 선체표면을 정의하는 패널과 선측파고의 상태를 비교한다.
- 2) 선체표면을 정의하는 각 패널의 4 모서리가 모두 선측파고보다 아래에 있으면 수치해석을 위한 패널에 포함하고, 그렇지 않고 4 모서리가 모두 선측파고보다 위에 있으면 선체표면 패널에 포함하지 않는다.
- 3) Fig. 1에서 보는 바와 같이 선체표면을 정의하는 각 패널의 4 모서리 중 1개 또는 2개 또는 3개가 자유수면보다 아래에 있을 수 있는데, 이때는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 패널을 재생성하여 선체표면 패널에 포함하면 된다.

Fig. 1에서 점선으로 표시된 패널은 초기에 주어진 패널이고 실선으로 표시된 패널은 현 반복 계산 단계에서 수치해석에 사용될 패널이다. 다음 반복 계산 단계에서는 현 반복 계산 단계에서 계산된 선측파고와 점선으로 표시된 패널의 상태를 검토하여 다시 선체표면의 패널을 생성하게 된다. Fig. 1에서 숫자는 입력순서를 나타낸다.

Fig. 2는 기존의 패널생성기법(a)과 패널절단법(b)을 사용하여 생성된 계산패널을 서로 비교한 것으로, 점선으로 표시된 것은 초기에 입력된 선체표면을 정의하는 패널을 나타내고, 실선으로 표시된 것은 교란되지 않은 자유수면에 대하여 생성된 계산패널을 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 패널

절단법을 사용하여 계산패널을 생성하는 경우에는 초기에 입력된 선체표면을 정의하는 패널의 기하학적 정보를 그대로 유지하는 반면, 기존의 패널생성기법을 사용하여 생성된 계산패널은 초기에 입력된 패널과는 서로 다른 형상을 가진다는 것을 알 수 있다(Choi et al., 2011).

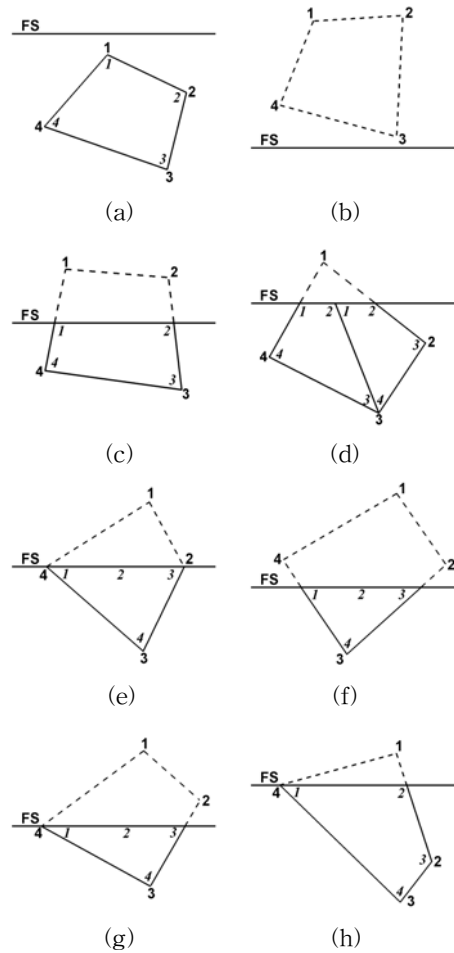


Fig. 1 Panel cutting cases

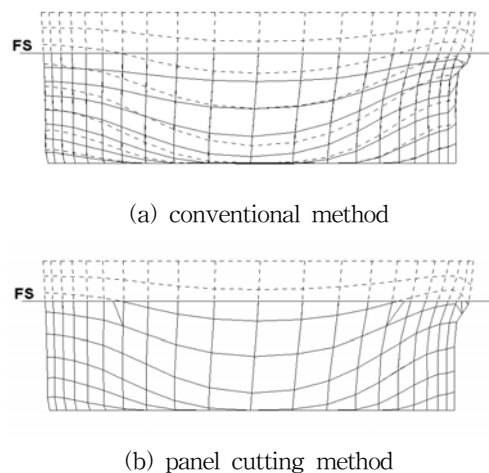


Fig. 2 Comparison of panels generated using conventional method and panel cutting method

### 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 부드러워야 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.

$$R(u,v) = \sum_{j=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_u} c_{i,j} B_i^3(u) B_j^3(v) \tag{9}$$

위의 식에서  $B_i^3(u)$ 와  $B_j^3(v)$ 는 3차의 기저함수를 나타내고, 계수  $c_{i,j}$ 는 B-spline 꼭지점(control vertices)이며,  $N_u$ 와  $N_v$ 는 각각  $u$ 와  $v$  방향의 B-spline 꼭지점의 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 연구에서는 앞 장에서 언급한 방법을 적용하여 Ro-Pax 선형에 대한 선형최적화를 수행하였다. 기존에 주어진 기준선을 가지고 선형최적화를 수행하였으며, 선형최적화를 수행하여 도출된 선도를 가지고 모형선을 제작하고 모형시험을 수행하였다.

초기에 주어진 기준선인 Ro-Pax선형의 선도와 제원은 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다.

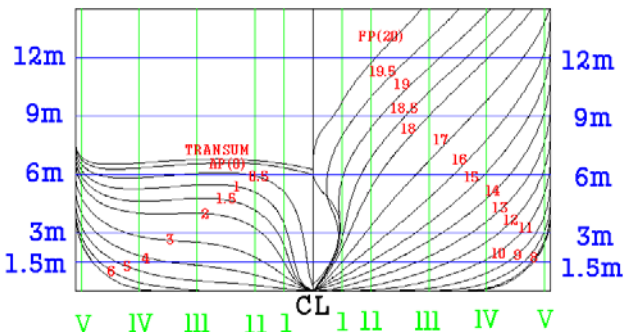


Fig. 3 Lines of the Ro-Pax ship

Table 1 Principal particulars of the Ro-Pax ship

Designation	Symbol	Ship	Model
Scale ratio	$\lambda$	17.35	
Design Speed	VS (knot)	25.8 (Fn=0.35)	
Length Overall	LOA (m)	157.0	9.0
Length Between Perpendiculars	LBP (m)	144.0	8.3
Breadth	B (m)	24.6	1.420
Depth	D (m)	14.5	0.835
Draft	TF/TA (m)	6.0	0.346

#### 5.1 설계변수의 선정

본 연구에서는 목적함수를 구하기 위하여 포텐셜기저 패널법을 사용하였다. 포텐셜기저 패널법은 유체의 성질이 비점성이라는 가정에 의하여 선박주위의 유동 양상 및 압력분포를 구하는 방법이다. 선박주위의 유동은 선수 유동이 선미 유동에 비하여 비교적 비점성 거동에 가까우므로 본 연구에서는 선수부에 대하여서만 선형최적화를 수행하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 대상선박으로 선택한 Ro-Pax 선형과 선형 최적화가 진행된 영역을 나타낸다. Fig. 5와 6에서 보는 바와 같이 최적화가 진행된 영역에 대하여 14×7(14개의 행(column)에 각각 7개의 줄(row))로 구성된 B-spline 꼭지점망(control vertices network)을 생성하고, 이 꼭지점 중에서 주요한 꼭지점을 선택하여 설계변수로 선택하였다.

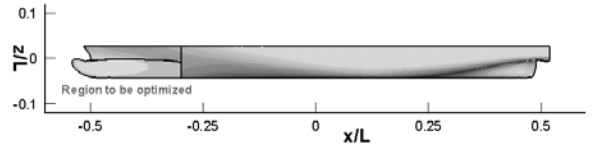


Fig. 4 Region to be optimized for Ro-Pax ship

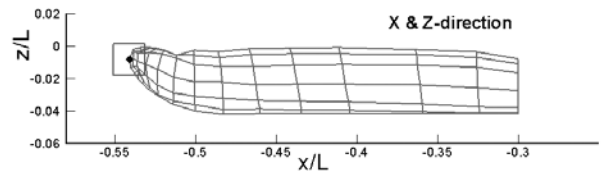


Fig. 5 Design variable movable in x- and z-direction

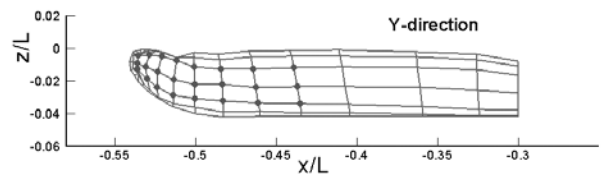


Fig. 6 Design variables movable in y-direction

Fig. 5는 x-축과 z-축으로 움직일 수 있는 설계변수를 나타낸 것이다. Fig. 3의 4각형 내에서 설계변수인 꼭지점이 움직이면서 선형을 변경하게 되며, 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음 식과 같다.

$$x^o/L - 0.01 < x/L < x^o/L + 0.01 \quad (10)$$

$$z^o/L - 0.01 < z/L < z^o/L + 0.01 \quad (11)$$

Fig. 6은 y-축으로만 움직일 수 있는 설계변수를 나타낸 것이다. Fig. 4의 설계변수인 24개의 꼭지점들이 움직이면서 선형을 변경하게 된다. 각 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음 식과 같다.

$$y^o/L - 0.005 < y/L < y^o/L + 0.005 \quad (12)$$

Fig. 4에서 보는 바와 같이 선형최적화가 시행되는 선체표면 영역과 선형최적화가 시행되지 않는 선체표면 영역에 대한 표면의 기하학적 연속성을 유지하기 위하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 오른쪽으로부터 4번째 행까지는 꼭지점을 고정하였으며, 각 행에서 아래에서 2번째(1번 줄과 2번 줄) 그리고 위에서 2번째(6번 줄과 7번 줄)까지의 꼭지점도 고정하였다.

### 5.2 제약조건의 설정

선박의 배수량과 접수표면적은 선박설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 선박의 배수량이 줄어들면 화물의 적재량이 줄어들게 되므로 배수량은 유지되거나 증가해야 하는 요소이고, 선박의 접수표면적이 늘어나게 되면 마찰저항이 늘어날 것이므로 피해야 하는 요소이다. 이 두 조건을 다 만족시키기 위해서는 선박의 배수량이나 접수표면적이 초기 상태에서 유지되는 것이 좋은 것이라고 생각된다.

$$\Delta \geq \Delta_{initial} \quad (13)$$

$$S_{WET} \geq S_{WET_{initial}} \quad (14)$$

### 5.3 수치해석 결과

5.1절에서 언급한 바와 같이 선수부의 일부영역에 대하여서만 선체의 형상을 바꾸어 가면서 최소 조파저항 관점에서 선형 최적화를 수행하였다.

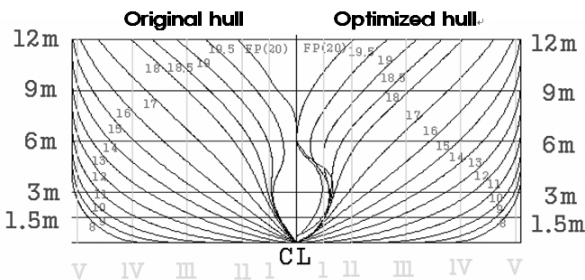
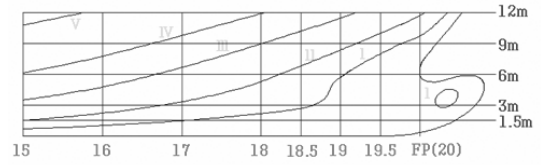


Fig. 7 Body plans of the original RoPax ferry hull and optimized hull

### Original hull



### Optimized hull

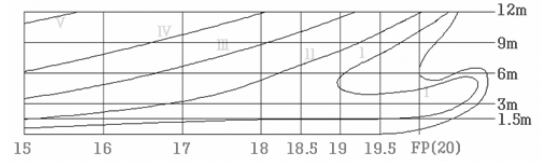


Fig. 8 Bow part buttock lines of the original RoPax ferry hull and optimized hull

Fig. 7과 8은 기준선형과 최적화된 선형에 대한 선수부에서의 정면도와 측면도를 나타낸 것이다. Fig. 7과 8을 보면 기준 선형에서 최적선형으로 변화되면서 벌브의 높이가 6m에서 약 6.6m로 설계흘수 보다 더 높아지고, 폭 방향으로도 커지는 형상을 보여주었다. 이는 최적선형의 벌브가 초기 정지상태에서는 자유표면 밖으로 돌출되지만 운항시에는 선수침하량이 고려된 최적형상으로 바뀐 것이다. 즉, 운항시의 자세변화가 고려되어 유체역학적 관점에서 벌브 효과를 극대화 시킨 형상으로 변화된 것이다. 또한, 폭 방향으로도 벌브가 커졌는데 이 역시  $Fn=0.350$ 인 고속선박의 경우 조파저항을 줄이는 관점에서 타당한 결과로 보여진다.

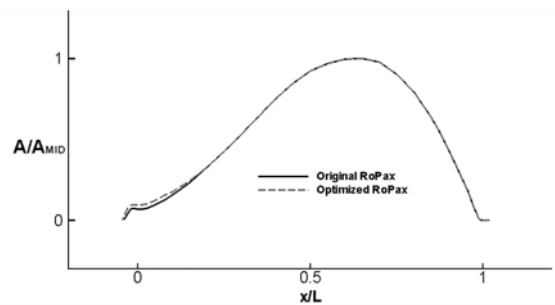


Fig. 9 Comparison of sectional area curves

Fig. 9는  $C_p$ 선도(Sectional Area Curve)를 서로 비교한 것이다. 최적선형의 벌브형상이 커짐으로 인해  $x/L=0$  근처에서 단면적이 증가되었으며, 이로 인해 선수어깨까지의 단면적 분포 곡선이 기준선형 보다 상대적으로 완만해짐을 보여주었다.

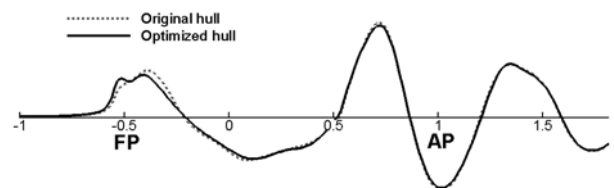


Fig. 10 Comparison of the wave profiles

Fig. 10은 기준선형과 최적선형의 선측과형을 서로 비교한 것이다. 기준선형의 선측과고와 비교하여 볼 때 최적선형의 선수가 두 개의 봉우리가 생기면서 과고는 작아진 것을 볼 수 있다. 그리고 선수어깨로 넘어가면서 선측과의 기울기가 완만해진 모습을 보여주었다.

Fig. 11은 기준선형과 최적선형에 대하여 자유표면에서의 파계를 서로 비교한 것이다. 최적선형의 Zone I 영역을 살펴보면 벌브 및 선수부 형상의 변화로 인하여 기준선형 보다 선수어깨 파형이 줄어든 모습을 보여주었다.

Table 2는 기준선형과 최적선형의 배수량, 접수표면적 그리고 조파저항계수를 서로 비교한 것이다. 최적선형의 배수량과 접수표면적이 기준선형 보다 각각 0.69%와 0.15% 증가하였지만 조파저항은 9.2% 정도 줄어들었다. 이는 벌브 및 선수부의 형상이 Fn=0.350 근처에서 최적화 되었다고 볼 수 있다.

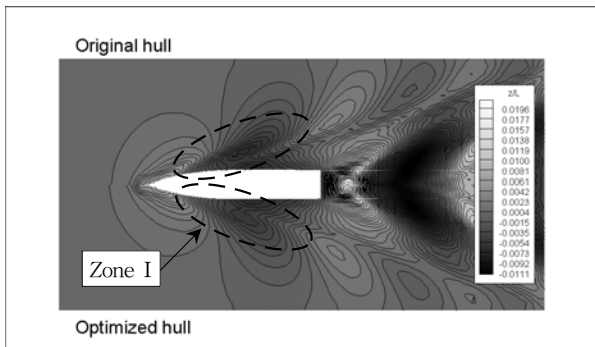


Fig. 11 Wave patterns(Fn=0.350)

Table 2 Comparison of hydrostatic/dynamic data

	Original hull	Optimized hull	$\Delta$ (%)
Displacement ( $m^3$ )	12126.5	12209.8	0.69
$S_{wet}$ ( $m^2$ )	3781.3	3787.4	0.15
$C_W$	2.08	1.89	-9.2

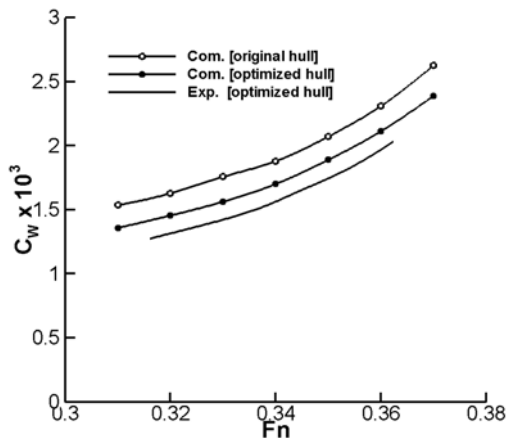


Fig. 12 Compariosn of the wave-making resistance coefficients

Fig. 12는 기준선형과 최적선형에 대하여 관심 있는 속도영역인 Fn=0.31에서 0.37까지 조파저항 성능을 비교한 것이다. 수치해석(Com.) 결과를 살펴보면 최적선형이 목표속도인 Fn=0.350 뿐만 아니라 전속도 영역에서 기준선형 보다 약 9% 정도 개선된 결과를 보여주었다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 최적선형에 대하여 모형시험을 수행하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 모형시험에 사용된 모형선의 길이는 9m이다. Fig. 12에 나타난 모형선의 조파저항계수를 구하기 위하여 ITTC 1978 성능예측방법(ITTC 1978 Performance Prediction Method)을 사용하였으며 마찰저항계수를 구하기 위하여 ITTC 1957 실선-모형선 상관곡선(ITTC 1957 ship-model correlation line)을 사용하였다. 최적선형의 수치해석 결과에 비하여 모형시험을 수행하여 얻은 실험값이 다소 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있으나 전반적으로 동일한 경향을 가진다는 것을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

포텐셜 유동해석 코드, 선형변환 그리고 최적화 기법을 접목하여 조파저항성능 관점에서 최적선형 도출이 가능한 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 Ro-Pax선박에 적용하여 선형 최적화를 수행하였다.

1. 비교적 고속인 Fn=0.35에서 수행된 선형최적화 결과 최적선형이 기준선형 보다 선수벌브가 폭 방향으로도 커지면서 높이가 역시 설계흘수 보다도 더 높아지는 형상을 도출하였다. 특히, 최적선형의 벌브 높이가 초기 정지상태에서는 자유표면 밖으로 돌출되지만 운항시의 자세변화가 고려되어 유체역학적 관점에서 벌브 효과를 극대화 시킨 형상변화로 판단된다.
2. 선측과의 기울기나 자유표면 파계에서도 최적선형이 기준선형 보다 개선된 모습을 보여주었다.
3. 배수량과 접수표면적은 제약조건 내에서 변화를 보였으며, 최적선형이 기준선형 보다 증가함에도 불구하고 조파저항이 줄어드는 현상을 보여주었다.
4. 관심 있는 속도영역인 Fn=0.31에서 0.37까지 조파저항 성능을 검토한 결과, 최적선형이 목표속도인 Fn=0.350 뿐만 아니라 전속도 영역에서 기준선형 보다 약 9% 정도 개선된 결과를 보여주었다.
5. 개발된 최적화 프로그램은 Ro-Pax선형과 같이 상대적으로 고속선박에서도 타당한 결과를 제시하였다.

## 참 고 문 헌

[1] 장학수, 이화준, 주영렬, 전호환(2003), “고속 대형여객선의 선형특성에 대한 연구”, 대한조선학회논문집, 제40권, 제4호, pp. 1-7.

[2] 최희중, 이경우, 윤순동(2006), “SQP법을 이용한 최적선형 개발에 대한 연구”, 한국항해항만학회지, 제30권, 제10호,

pp. 869-875.

- [3] Choi, H. J., Chun, H. H., Park, I. R. and Kim, J.(2011), "Panel cutting method-new approach to generate panels on a hull in Rankine source potential approximation", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 225-292.
- [4] Choi, H. J., Lee, G. W., Youn, S. D. and Chun, H. H.(2005), "Study on the development of an optimal hull form", International Journal of Navigation and Port Research, Vol. 29, No. 7, pp. 603-609.
- [5] Raven, H. C.(1996), "A solution method for the nonlinear ship wave resistance problem", MARIN, Holland, Ph. D. thesis, Technical university of Delft.
- [6] Vanderplaats, G. N.(1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Designs, McGraw-Hill, New York.
- [7] Zhang, B. J.(2009), "The optimization of the hull form with the minimum wave making resistance based on Rankine source method", Journal of Hydrodynamics, Vol. 21, No. 2, pp. 277-284.
- [8] Zhang, B. J.(2012), "Research on optimization of hull lines for minimum resistance based on Rankine source method", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 89-94.

---

원고접수일 : 2012년 10월 11일  
심사완료일 : 2012년 11월 16일  
원고채택일 : 2012년 12월 07일