

최소 조파저항을 가지는 컨테이너선의 선형최적화 기법에 대한 연구

최희종^{†*}, 서광철*, 김방은*, 전호환*

부산대학교 조선해양공학과*

Development of an Optimum Hull Form for a Container Ship with Minimum Wave Resistance

Hee-Jong Choi*, Kwang-Cheol Seo*, Bang-Eun Kim* and Ho-Hwan Chun*

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

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 B-spline surface patches. The optimization method is applied to Series 60 hull and KCS(KRISO 3600 TEU Container Ship). The obtained results prove that the method is appropriate for preliminary hull form design.

※Keywords: Optimum Hull Form(최적선형), Minimum Wave Resistance(최소 조파저항), Panel Method(패널법), Sequential Quadratic Programming(순차이차계획법)

1. 서론

저항은 선형설계에 있어서 고려하여야 할 주요 요소이다. 최소저항을 갖는 최적 선형을 찾고자 하는 선박유체역학자들과 선형설계자들의 수세기

에 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

접수일: 2003년 4월 29일, 승인일: 2003년 6월 26일

†주저자, E-mail: hjchoi@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2756

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 김희정 등(2000)은 WIG 선과 Series60 선의 최적화에 빠른 수렴성과 유용성을 보여준 SQP법을 이용하였으며, Janson 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 연구의 목적은 최소 조파저항을 가지는 최적선형을 구하는 기법의 개발에 대한 연구이며, 목적함수인 저항을 구하기 위한 CFD기법으로 비선

형 랭킨소오스 패널법을 사용하여 선체에 미치는 조파저항을 구하였고, 마찰저항은 ITTC 1957년 공식을 사용하였으며, 최적화 기법으로는 비선형 계획법의 하나인 SQP법을 사용하였다. 선체표면의 표현과 변경은 B-spline곡면 패치를 사용하여 나타내었다. 최적화 대상선박은 Series 60 선형과 모형선인 KCS(KRISO 3600 TEU Conatainer Ship) 선형을 선택하여 최적화 계산을 수행하였다.

2. 최적화 알고리즘

최적화 문제에 대한 일반식은 다음과 같다.

최적화 문제

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

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 일차식으로 제약조건은 일차식으로 근사하여 근사 부문제를 얻는다 (Vanderplaats 1984). 근사 부문제를 탐색방향인 d 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

비선형 계획 알고리즘

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

위의 식에서 B 는 라그랑지(Lagrange)의 헷세 행렬(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 반복해에서 설계변수는 $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ 에 의하여 변화하며, α_k 는 이동거리를 나타낸다.

3. 목적함수의 계산

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

조파저항의 계산

선체주위의 유동이 비점성, 포텐셜 유동이라는 가정과 자유수면 경계조건의 비선형성을 고려한 랜킨소오스 패널법에 의해 선체주위의 유동을 계산하고 선체표면에서의 속도성분을 구하였다. 베르누이의 정리를 이용하여 선체표면에서의 압력계수를 구한 다음, 압력계수를 선체표면에 걸쳐서 적분하여 선체에 미치는 조파저항을 계산하였다(Raven 1996, 김도현 등 2000, 최희중 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 레이놀즈 수(Reynold's number)를 나타낸다.

전저항의 계산

전저항은 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 불연속 점이나 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.

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

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

y 방향의 B-spline 꼭지점의 개수이다.

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

5. 수치계산결과 및 고찰

본 연구에서는 Series 60 선형과 KCS 선형에 대하여 최적화 계산을 수행하였다.

5.1 Series 60 선형

설계변수의 선정

Series 60 선형에 대한 설계변수는 Fig. 1에 보는 바와 같이 선수에서 25%까지의 기준선형에 B-spline surface fitting을 하여 선형변경을 위한 B-spline 꼭지점을 만들었다. Fig. 1에서 ○로 표시된 좌표는 y 방향으로 변화를 허용하는 설계변수를 나타내고, X로 표시된 좌표는 x 와 z 방향으로 변화를 허용하는 꼭지점을 나타낸다.

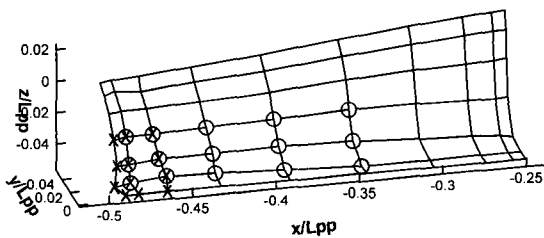


Fig. 1 Design variables for series 60 Hull

선박설계에 있어서 중요한 고려사항인 수선면의 면적을 유지하기 위하여 자유수면 아래에 있는 꼭지점만을 설계변수로 잡았으며, 선형을 고정한 선미부와의 연속성을 주기 위하여 x 방향으로 6번째 이후의 꼭지점을 고정하였다.

각 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음과 같다.

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

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

제한조건의 설정

기준선형과 최적선형에 대하여 목적함수인 저항값을 비교하기 위하여 배수량을 고정하는 것이 일반적이지만, Series 60 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 요건이므로, 이 같은 현상을 방지하기 위하여 다음의 조건을 부가하였다.

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

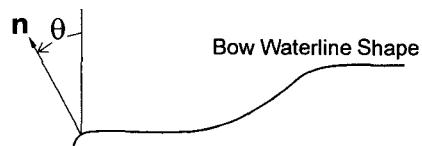


Fig. 2 Definition of θ

Fig. 2에서 n 은 선체표면에 대한 법선벡터를 나타내고, θ 는 법선벡터와 선체의 횡단면이 이루는 각을 나타낸다.

수치계산 결과

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

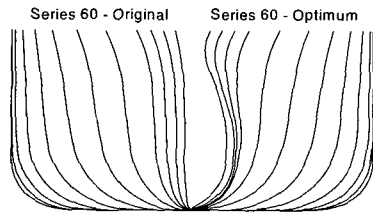


Fig. 3 Comparison of body plan

Fig. 3는 기준선형인 Series 60 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 선폭이 선미 쪽으로 갈수록 증가하는 것에서 최적화 계산이 식(8)의 제한조건을 충실히 이행하는 것을 알 수 있다. 그리고, 자유수면에서의 수선(Waterline)이 기준선형과 최적선형을 비교하여 다소 일치하는 것을 볼 수 있다.

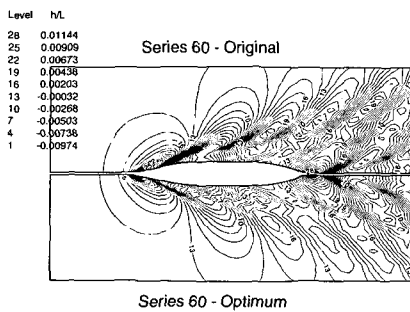


Fig. 4 Comparison of wave contour

Fig. 4는 파형을 서로 비교한 것이다. 기준선형과 비교하여 선체의 어깨(shoulder)에서 발생한 파가 최적선형에서는 벌브에서 발생한 파로 인하여 파고가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 선측파형을 비교한 것이다. 기준선형

과 비교하여 최적선형에서는 벌브의 존재로 파가 빨리 발생하는 것을 볼 수 있으나, 기준선형에서 발생하는 선수근처의 파가 최적선형에서는 벌브의 영향으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6는 기준선형과 최적선형의 SAC곡선을 서로 비교한 것이다. 기준선형과 비교하여 최적선형의 선수부에서 벌브의 존재로 C_p 의 값들이 증가한 것을 볼 수 있다.

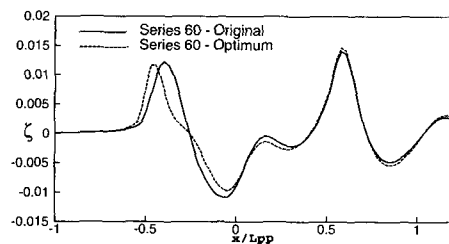


Fig. 5 Comparison of wave profile

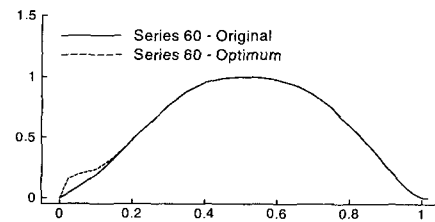


Fig. 6 Comparison of Cp curve

Table 1 Comparison of hydrostatic data and resistance(Series 60)

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

Table 1은 기준선형과 최적선형의 유체 정역학적 특성치인 배수량과 침수표면적, 그리고, 유체동역학적 특성치인 조파저항과 전저항을 서로 비교

한 것이다.

전저항을 구하기 위하여 앞에서 언급한 바와 같이 Hughes의 3차원 법을 사용하였으며, 전저항 계산에 필요한 Series 60 선형에 대한 형상계수 ($1+k$)는 1.029가 된다. 배수량과 침수표면적은 기준선형과 비교하여 다소 증가한 것을 볼 수 있다. 그러나, 이 같은 불리한 조건에도 불구하고, 전저항은 6.573%가 줄고, 조파저항은 29.38%가 줄었다는 것은 선수 벌브의 존재가 얼마나 유용한 저항의 감소요소인지를 단적으로 보여준다.

5.2 KCS 선형

설계변수의 선정

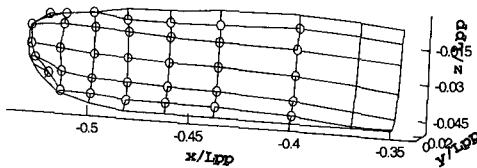


Fig. 7 Design variables for KCS hull

KCS 선형에 대한 설계변수는 Fig. 7에 보이는 바와 같이 선수에서 15%까지의 벌브 부분을 B-spline surface fitting을 하여 선형변경을 위한 B-spline 꼭지점을 만들었다. Fig. 7에서 ○으로 표시된 좌표는 y 방향으로 변화를 허용하는 설계 변수를 나타낸다.

여기서도, 선형을 고정한 선미부와의 연속성을 주기 위하여 x 방향으로 8번째 이후의 꼭지점을 고정하였다. 각 설계변수가 이동할 수 있는 허용상한과 하한은 다음과 같다.

$$0.000 < y/Lpp < 0.0342 \quad (9)$$

제한조건의 설정

Series 60 선형의 경우와 마찬가지로, 배수량은

기준선형보다 커야 한다는 조건을 사용하였다.

KCS 선형의 경우 식(8)의 θ 에 대한 범위의 설정에 있어서, 식(8)과 같은 조건을 부과하게 되면, 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있었다. 즉, 식(8)과 같은 조건에서는 거의 최적화가 이루어진 상태인 것으로 생각된다. 그래서, 본 연구에서는 θ 의 하한을 -5° 로 주어서 선형을 진화시키고자 하였다.

수치계산 결과

$Fn = 0.26$ 에 대하여 유동계산을 수행하였으며, 비선형 자유수면경계조건을 사용하였고, 선체의 트림과 침하를 고려하였다.

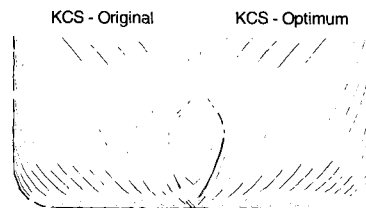


Fig. 8 Comparison of body plan

Fig. 8는 기준선형인 KCS 선형과 그에 대한 최적선형의 선수부에 대한 정면도(Body plan)를 서로 비교한 것이다. 기준선형과 비교하여, 최적선형에서 벌브의 중간 부분에서 y 방향으로 약간 돌출한 것을 볼 수 있었다. 이 같은 양상은 Daniele 등(2001)의 유조선에 대한 최적화 연구 논문에서도 볼 수 있었다.

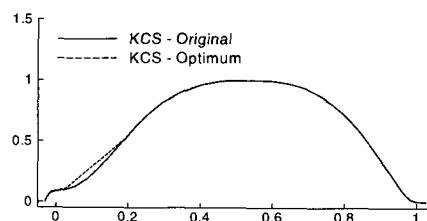


Fig. 9 Comparison of Cp Curve

Fig. 9는 기준선형과 최적선형의 SAC곡선을 서로 비교한 것이다. 선수부의 어깨 부분에서 C_p 의 값들이 증가한 것을 볼 수 있다.

Table 2은 배수량과 침수표면적, 그리고 조파저항과 전저항을 서로 비교한 것이다. 본 연구에서 사용한 KCS 선형에 대한 형상계수 ($1+k$)는 1.153106이다. 배수량과 침수표면적은 기준선형과 비교하여 다소 증가하였지만, 조파저항과 전저항은 감소한 것을 볼 수 있다.

Table 2 Comparison of hydrostatic data and resistance(KCS)

	Original	Optimum	$\Delta(\%)$
C_B	0.6503	0.6529	+0.3956
S_{wet}	0.1791	0.1827	+1.9521
R_{WM}	0.0481	0.0428	-10.879
R_{TM}	0.3477	0.3416	-1.7394

6. 결론

최소 조파저항을 가지는 최적선형을 찾아내는 최적화 기법에 대하여 수치적으로 연구를 수행하였다. 선체에 미치는 저항을 목적함수로 하고, 최적화 기법으로 SQP법을 사용하였으며, Series 60 선형과 KCS 선형에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 배수량이나, 침수표면적의 증가에도 불구하고, 전저항이나 조파저항이 줄어드는 것을 알 수 있었다.
2. 선수부의 저항의 감소방향은 벌브를 생성하는 방향으로 진화한다는 것을 확인하였다.
3. 본 연구의 결과로 생성된 최적선형을 이용하여 모형선을 제작하고, 모형시험을 통하여 타당성을 검증한 후, 다른 선종에 대해서도 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 한국 과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 김성은 1991 "최소조파 저항성능을 갖는 최적선 수형상에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제 8권 제 2호, pp.28-39.
- 김희정, 전호환 1999 "비선형 최적화 기법을 이용한 2차원 지면효과곡의 형상설계", 대한조선학회 논문집, 제 36권 제 3호, pp.50-59.
- 김도현, 김우전, 반석호 2000 "패널법을 이용한 일반 상선의 비선형 조파문제 해석", 대한조선학회 논문집, 제 37권 제 4호, pp.1-10.
- 김희정, 전호환 2000 "비선형 최적화 기법에 의한 최소 조파저항 선형 생성", 대한조선학회 논문집, 제 37권 제 4호, pp.11-18.
- 최희중, 전호환, 하동대 2001 "트랜섬 선미를 가지는 선형의 비선형 포텐셜 유동해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 195-198.
- Vanderplaats, G.N. 1984 "Numerical Optimization Techniques for Engineering Designs," McGraw-Hill, New York.
- Holtrop, I.J. 1984 "A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data," International Ship-Building Progress, Vol. 31. pp. 272-276.
- Raven, H.C. 1996 "A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem," Doctor's Thesis, Delft Univ. Techn., Delft, Netherlands.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.



< 최 희 종 >



< 서 광 철 >



< 김 방 은 >



< 전 호 환 >