

비선형 최적화 기법에 의한 최소 조파저항 선형 생성

김희정*, 전호환**

Hull Form Generation of Minimum Wave Resistance by a Nonlinear Optimization Method

Hee-Jung Kim* and Ho-Hwan Chun**

요 약

본 논문은 조파저항 성능 평가법을 비선형 계획법에 적용해서 선수 형상의 최적화에 응용한 연구결과이다. 조파저항은 비점성 포텐셜 유동의 가정으로 랭킨 소오스법 (Rankine source method)을 이용하여 계산하였고 최적화 기법으로는 SQP(Sequential Quadratic Programming)법을 이용하였다. 선수형상의 표현과 변경은 스플라인(spline)함수를 이용하였으며 본 방법에 의하여 조파저항이 최소가 되는 선수형상의 결정이 가능하였다. 또한 마찰저항공식과 경험식으로 주어지는 형상영향계수 (form factor)를 고려한 점성저항을 첨가하여 총 저항이 최소가 되는 선수 형상도 도출하여 서로 비교하였다.

Abstract

This paper is concerned with the generation of an optimal forward hull form by a nonlinear programming method. A Rankine source panel method based on the inviscid and potential flow approximation is employed to calculate the wave-making resistance and SQP method is also used for the optimization. The hull form is represented by a spline function. The forward hull form of a minimum wave resistance with the given design constraints is generated. In addition, the forward hull form of a minimum total resistance by considering the frictional resistance together with an empirical form factor is produced and compared with the former result.

접수일자: 2000년 6월 1일, 승인일자: 2000년 8월 29일

*학생회원, 부산대학교 조선해양공학과 대학원 (현재 현대중공업(주))

**정회원, 부교수 부산대학교 조선해양공학과 (기계기술연구소)

E-mail: chunahh@hyowon.cc.pusan.ac.kr

1. 서 언

최적화 기법과 전산기를 이용한 새로운 선형설계에 대한 관심이 증대되고 있으며, 따라서 최소저항성능을 갖는 선형에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Hsiung (1981, 1984)은 선체를 텐트(tent)함수로 나타내고 박선(thin ship)이론을 이용하여 조파저항이 최소가 되는 선형을 생성하였다. 이 경우 조파저항 해석을 박선이론에 의존하고 있으므로 이 이론이 가지는 한계 즉, 기존 선형이 날선해야 하는 제약이 있다. 이를 극복하기 위해 Sharma/Naegle(1970)은 조파저항 계산시 파형해석 실험결과를 이용하였으며 이 방법으로 구상선수의 최적형상을 구하였다. Kim (1991)은 기존선형에 Neumann-Kelvin이론을 사용하여 파형해석을 하고 미소변화량에는 박선이론을 적용하여 선체 저항을 계산 하고 최적화를 시행하였다. Hirayama et al.(1998)은 실험에 따른 파형해석 대신 랜킨소오스법을 이용한 파형해석을 하여 선형 최적화를 시행하였다. 역해법(inverse method)의 적용에는 Chou et al.(1998)이 B-spline surface method를 사용하여 선체를 표현하고 선체의 압력분포를 부분적으로 변형하여 이를 만족하는 새로운 선형을 도출하였다. 그러나 이러한 방법은 설계자의 경험에 의존해야 되는 단점이 있다.

최근 CFD를 이용한 선체 주위의 유동장 해석이 활발히 진행되고 있는데 Janson/Larsson (1996)이 선수는 포텐셜 유동에 의한 조파저항을 구하고 선미는 Navier-Stokes 방정식을 풀어서 점성저항을 계산하여 최적화를 시행하였다. Hino et al.(1998), Himeno/Tahara(1998), Huan/Huang(1998)은 선형의 최적화에 CFD를 사용하여 전체저항이 감소하는 선형을 설계하였다.

본 논문은 조파저항의 관점에서 최적선형생성을 시도하였다. 선체는 Ferguson basis를 이용한 nonuniform parametric 스플라인(Kim/Van 1999)을 이용하여 선체표면을 유한개의 패넬로 나누고 랜킨소오스 패넬법을 이용하여 조파저항을 계산하였다. 그리고 최적화 수법은 Kim/Chun

(1999a), Kim/Chun(1999b)이 WIG 선의 최적화에 이용하여 그 유용성과 빠른 수렴성을 보여준 비선형 계획법의 하나인 SQP법을 이용하였다. 최적화 시행은 Series 60선형을 기준선으로 하여 제약조건을 만족하면서 조파저항이 최소가 되는 선형을 생성하고 마찰저항과 경험식으로 주어지는 형상영향계수(form factor)의 항을 첨가하여 전저항이 최소가 되는 선형도 생성하였다. 선형의 표현과 변경은 스플라인 함수를 이용하였다. 오프셋을 설계변수로 택하고 선체의 패넬을 스플라인을 이용하여 생성할 경우 패넬의 수와 상관 없이 설계변수의 수가 고정되어 계산 시간을 단축시킬 수 있는 큰 장점이 있다.

2. 선체의 표현

최적화 각 단계마다 주어진 선박의 오프셋을 이용하여 조파저항의 계산에 필요한 선체표면격자계의 생성이 필요하다. 본 논문에서는 Kim/Chun(1999a)이 발표한 방법을 이용하여 선체를 유한개의 패넬로 나누어 포텐셜 유동 계산에 이용한 격자를 생성하였다. 이 방법은 계산시간이 몇 분내에 이루어 지므로 반복계산이 많은 최적화 계산 적용에 유리하다. 또한 선체의 중심선인 side profile도 함께 생성할수 있어서 최적화 적용에 있어서 선수 side profile 의 변화도 시도할수 있다.

패넬을 설계변수로 사용하는 경우 패넬이 늘어날수록 설계변수의 수도 늘어나서 계산시간이 증가하지만 오프셋을 설계변수로 택하고 선체의 패넬을 스플라인을 이용하여 생성할 경우 패넬의 수와 상관 없이 설계변수의 수가 고정되어 계산 시간을 단축시킬수 있다. 또한 선도의 호트러짐을 억제하기 위한 순정(fairing) 조건은 이러한 스플라인을 사용함으로써 형상변화가 매끄럽게 되므로 따로 고려하지 않아도 된다.

3. 최적화문제의 정식화와 수치계산

최적화 문제의 정식화는 주어진 문제를 수학적

표현으로 변환하는 것이다. 이는 설계변수, 목적함수를 설정하고 이것을 설계변수의 함수로 표현하며 모든 설계제약조건을 확인하여 이들을 수식으로 표현하는 것이다.

3.1 설계변수의 설정

설계변수로는 선체를 나타내는 오프셋을 택하였으며, 조파저항에 크게 영향을 미치는 선수부분만을 택하였다. 단면형상은 설계변수의 오프셋으로부터 주어진 node점을 지나는 3차 스플라인(cubic spline)으로 표현하여 이 node점의 z좌표를 변화시킴으로써 단면형상을 변화시킬 수 있다. 따라서 설계변수는 L_{pp} 의 25%까지의 오프셋 42개점과 선수 side profile 5개점으로 모두 47개이며 수선면 형상을 고정하였을 경우는 40개가 된다.

3.2 목적함수의 설정

선체의 조파저항(R_w)과 전저항(R_T) 두가지 목적함수를 사용하였다. 주어진 조건에서 조파저항 혹은 전저항이 최소가 되도록 하는 것이다.

$$f = R_T \text{ or } R_w$$

조파저항 계산

비점성, 포텐셜유동의 가정으로 랜킨소오스 분포법에 의해 선체표면의 압력 적분으로 조파저항을 계산하였다. 자세한 수식전개와 프로그램의 검증 결과는 Chun등[15]을 참고하기 바란다.

전 저항 계산

전 저항은 다음에 의해 계산된다.

$$R_T = 0.5\rho U_\infty^2 S [C_W + C_F (1+k)]$$

여기서, C_W 와 C_F 는 조파저항 및 마찰저항 계수, $(1+k)$ 는 Holtrop(1984)에 의해 제안된 다음의 경험식을 사용하였다.

$$1+k = 0.93 + 0.487118 c_{14} (B/L)^{1.06806}$$

$$(T/L)^{0.46106} (L/L_R)^{0.121563} (L^3/V)^{0.36486}$$

$$(1 - C_p)^{-0.604247}$$

여기서 c_{14} 는 선미형상에 따른 계수로 Series 60선형의 경우 $c_{14} = 1$ 이며 $L = L_M$, $B =$ 폭, $T =$ 흘수, $L_R =$ 런(run)부 길이, $V =$ 부피, C_p 는 주형계수 S 는 침수표면적, ρ 는 물의 밀도이다.

3.3 제약조건의 설정

제약조건은 설계변수의 함수로 표현되며 부등호 제약조건과 등호제약조건이 있다. 아래는 모든 가능한 제약조건을 언급하고 경우에 따라서 적절한 제약조건들을 적용시킨다.

- 선체 배수량에 대한 제약 : 저항 값을 비교하기 위해서는 배수량을 고정하는 것이 일반적이거나, 배수량을 고정할 경우는 선형의 변화가 너무 미소할 수 있기 때문에 배수량의 변화는 주어진 초기 배수량의 2%내에서 변화게 하였다.

- 수선(water line)의 기울기에 대한 제약 : 급격한 수선의 형상변화를 방지하기 위하여 그 기울기를 양(+)으로 제약하였다.

- 수선면 형상에 대한 제약 : 필요시 수선면 형상을 고정하였다.

3.4 SQP법

SQP법은 비선형의 목적함수와 제약조건을 설계 변수에 대해서 Taylor 전개하여, 목적함수는 이차식으로 제약조건은 일차식 선형으로 근사하여 근사부문제를 얻는다(Vanderplaats, 1984). 그 결과로 목적함수를 감소시키는 방향이 구해지면 이동거리를 결정하여 근사의 최적해를 부여한 점을 구한다. 이것을 다음단계의 설계점으로 하여 반복 적용함으로써 최종적으로 최적해를 얻는 방법이다. 매 반복회에서 $X_{k+1} = X_k + \alpha_k S_k$ 가 되며, α_k 는 양의 스칼라로서 그 방향에서의 이동거리이며 S_k 는 탐색방향이고 X_k 는 설계변수이다.

4. 계산결과 및 토론

조파저항 계산은 랜킨소오스법에 의해 계산되며

본 연구에 사용된 프로그램은 Chun et al.(1997)에 의해 계산의 정도가 검증된 프로그램이다. Fig.1은 Series 60 선형에 대한 계산 결과와 실험 결과를 비교하고 있다. Fig.2는 최적화에 사용된 선체와 자유표면의 패널분포를 나타낸다. 선체는 y 방향으로 7개 패널과 x 방향으로 20개 패널로 분할하였고 자유표면은 15×50 개의 패널을 사용하여 x 방향으로 $-0.5L \leq x \leq 2.0L$, y 방향으로 $0 \leq y \leq 0.67L$ 범위로 하였다. 패널법의 경우 패널수와 자유표면의 영역은 수렴된 값을 얻을 수 있을 때 까지 충분히 늘려야 된다. 하지만 패널수가 증가함에 따라 계산시간이 많이 증가하고 반복에 의해 계산되는 최적화 과정에서는 급격한 계산 시간의 증가를 초래한다.

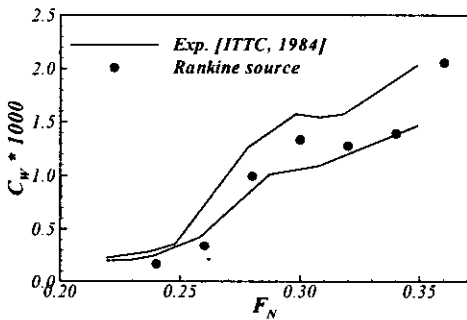


Fig.1 Wave resistance coefficient for Series 60 with ITTC experimental (residuary resistance coefficient) range

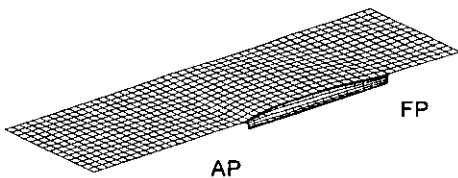


Fig.2 Panel arrangement for hull and free surface

Fig.1에 보는 바와 같이 계산된 조파저항 계수가 실험 결과의 범위에 있기 때문에 타당한 것으로 생각되어 본 연구에서 사용된 패널수는 최적화

과정 모두에 Fig.2에 보이는 패널수를 사용하였다.

주어진 제약조건을 만족하며 저항이 최소가 되는 선형 생성을 할 수 있었으며 본 논문에서는 다음 3가지 경우에 대한 결과를 보인다.

Case 1. 조파저항의 최소화

Case 2. 수선면적을 고정하여 조파저항의 최소화

Case 3. 전저항의 최소화

최적화 시행은 초기선형을 Series 60 ($C_B = 0.6$)을 사용하였고 $F_N = 0.316$ 에서 시행하였다. Fig.3은 기준선의 정면도와 선수 side-profile 그리고 선수부분의 반폭도를 나타낸 그림이다. 조파저항에 영향을 미치는 선수부분(L_{pp} 의 25%)을 설계변수로 두었으며 나머지 부분은 고정하였다.

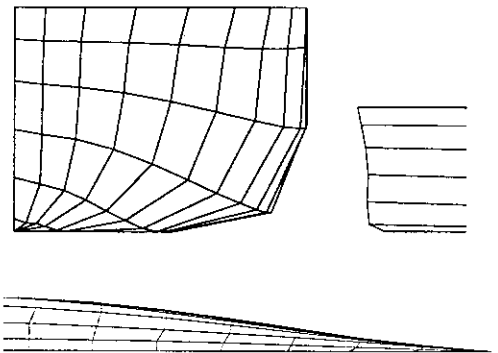


Fig.3 Body plan, side profile and half-breadth line of Series 60 (CB=0.6) initial ship

Case 1. 조파저항의 최소화

제약조건은 수선기울기 제약과 배수량 제약을 하여 조파저항을 목적함수로 두고 최적화를 시행하였다. 이 경우 설계변수는 선수 오프셋과 side-profile의 위치로 모두 47개이다. Fig.4는 Case 1의 결과 선형의 형상을 나타내었다. 초기 선형에 비하여 선수 부분의 단면적이 증가한 형상이 되었고 side-profile은 앞으로 약간 튀어 나온

형상이 되었다. 이러한 형상은 구상선수 모양을 나타낼려는 움직임이며, 수선면 기울기가 양이어야 된다는 제약 조건 때문에 완전한 구상선수 형상을 나타내고 있지는 않는다. 수선 제약조건을 완화하면 구상 선수 형상을 보여 주었으나 수선 방향과 수심방향으로 동시에 급격한 곡률 변화로 부드러운 형상의 도출이 다소 어려워서 양의 기울기를 가져야되는 수선제약조건을 그대로 사용 하였다.

급격한 곡률변화는 패널수를 증가시키면 다소 완화시킬 수 있었으나, 패널수의 증가는 급격한 계산시간을 초래하였다. 참고로 Case 1의 경우 SGI Origin 슈퍼컴퓨터 (CPU R10000 4개, 1.4 GFLOPS)를 사용하여 약 20시간이 소요되었다.

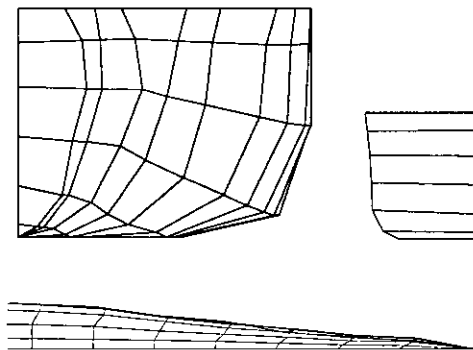


Fig.4 Body plan, side profile and half-breadth line of Case 1 optimum ship

주어진 속도에서 조파저항계수의 값은 Series 60이 1.29×10^{-3} 에서 최적선형은 0.95×10^{-3} 으로 26.3% 감소하였다. 최적선에 대한 속도별 조파저항계수를 계산하여 Fig.7에 보여주고 있으며 Series 60, Case 2, Case 3의 결과와 동시에 보여주고 있다. 이에 대한 설명은 뒤에서 다시 하기로 한다.

Case 2. 수선면적 고정하여 조파저항의 최소화

제약조건과 목적함수는 Case 1과 동일하게 두

고 수선의 형상에 대한 제약을 첨가하였다. 즉 수선의 오프셋을 고정하였으므로 설계변수는 40개이다. 조파저항에 영향을 미치는 수선의 형상을 고정하면 Case 1의 결과에서 보인 수선의 형상이 다소 매끄럽지 못한 점을 피할 수 있다. Fig.5는 Case 2의 결과 선형을 나타낸 그림이다. 이 선형의 조파저항계수는 0.93×10^{-3} 으로 28% 감소하였고 선수 부분의 단면적은 Case 1 보다 좀 더 증가하였다. 초기선형과 최적선형의 조파저항을 Fig.7에 비교하였다.

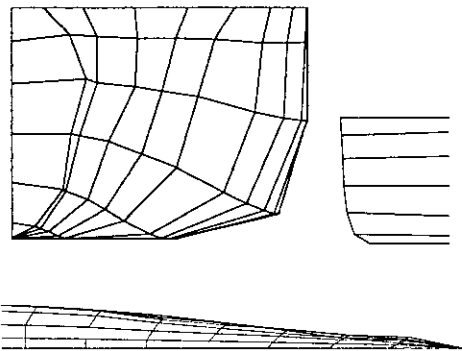


Fig.5 Body plan, side profile and half-breadth line of Case 2 optimum ship

Case 3. 전저항의 최소화

수선기울기 제약과 배수량 제약을 만족하면서 전저항을 목적함수로 두고 최적화를 시행하였다. 조파저항의 감소를 위한 형상의 변화는 형상저항의 증가를 가져오는 모양이 되어 전체저항이 증가할 수 있으므로 이때 마찰저항의 항을 첨가하면 무리한 선체 표면적의 증가를 막을 수 있다.

Fig.6은 Case 3의 결과 선형이다. Case 1과 비슷한 선형이지만 선수 side-profile의 형상은 선수 선저 부분이 Case 1보다 증가한 형상이 되었다. 조파저항계수도 26.2% 감소하였다.

Fig.7은 초기 선형과 앞에서 보여준 3가지 결과 선형의 조파저항계수의 비교 그림이다. 앞에서 언급한 바와 같이 최적설계 시행속도 ($F_N = 0.316$)에서 조파저항계수값이 감소하였고

3가지 경우 거의 비슷한 결과를 보인다. 또한 $F_N = 0.26$ 이하를 제외하고 계산한 다른 속도영역에서도 조파저항계수 값이 크게 작게 나타남을 보이고 있다. 즉 최적시행속도 전후에서 저항이 감소함을 알 수 있고, 속도가 더욱더 증가하거나 감소하면 오히려 조파저항이 증가하는 것을 보이고 있다. Fig.8은 $F_N=0.316$ 에서 초기선형에 대한 실험 값(toda et al. 1991)과 계산 값, 그리고 Case 3의 최적선형의 wave contour의 비교 그림이며 Fig.9는 자유표면의 파고를 비교한 그림이다. $Y=0.1L$ 과 $Y=0.3L$ 에서의 파고 모두 최적선형의 파고가 낮아짐을 볼 수 있다.

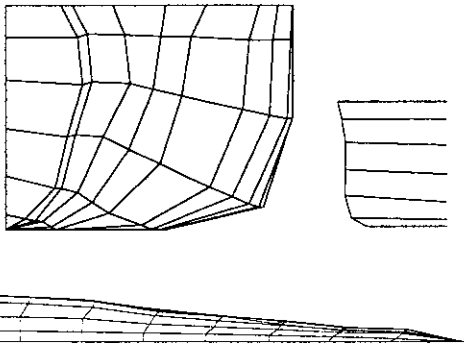


Fig.6 Body plan, side profile and half-breadth line of Case 3 optimum ship

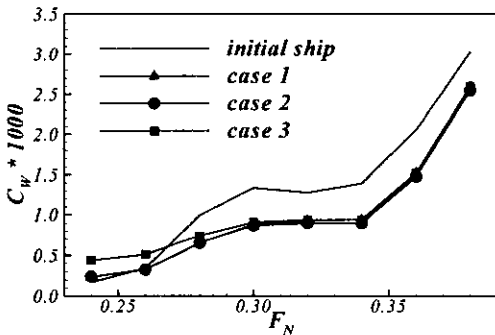


Fig.7 Wave resistance coefficient vs. speed for initial ship and three optimum ships

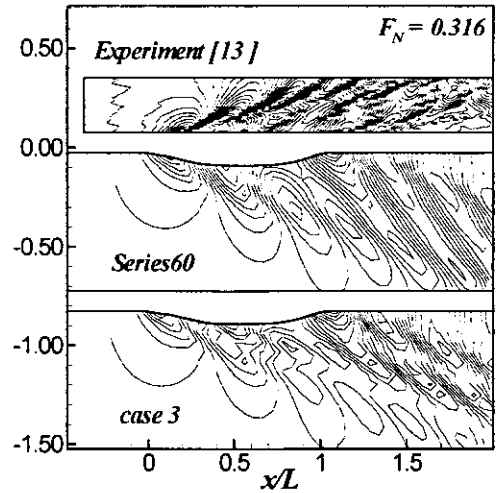


Fig.8 Comparison of Wave Contours for Series 60 and Case 3 optimum hull

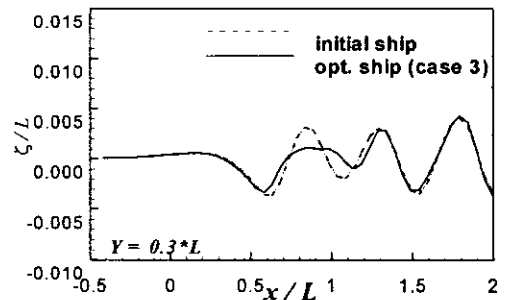
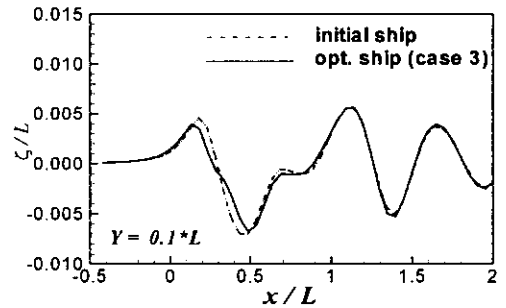


Fig.9 Wave Elevation of Series 60 and Case 3 optimum hull

5. 결 론

본 논문은 저항이 최소가 되는 선수 형상의 최적설계를 시행하였다. 조파저항은 랭킨소오스법을 사용하였고 선체 표현은 스플라인 함수를 사용하였으며 최적화 기법은 SQP법을 사용하였다. 주어진 제약조건을 만족하며 저항이 최소가 되는 선형을 생성할 수 있고 약 26%의 조파저항의 감소를 보였다. 최적 선형은 초기 선형보다 선수 단면적이 증가한 형상이 되었다. 이러한 형상은 구상선수의 모양을 보여주고 있으나 양의 기울기가 되어야 된다는 수선제약 조건 때문에 완전한 구상선수 형상을 보여 주지는 않는다. 수선 제약조건은 급격한 수선의 형상 변화를 방지하기 위함이며 이 제약조건을 보다 완화하거나, 패널수를 증가시키면 뚜렷한 구상선수의 형상이 도출되었으나 수선 방향과 수심방향으로 동시에 급격한 곡률 변화로 부드러운 형상의 도출이 다소 어려웠다. 더욱이 패널 수의 증가는 급격한 계산시간이 소요되었다. 따라서 급격한 곡률변화를 제거함과 동시에 계산 시간도 줄일 수 있는 보완책이 필요하다고 생각된다. 그러나 본 방법의 적절한 사용과 설계자의 경험을 결합하면 조파저항과 총저항을 감소시키는 실선 설계에 유용하게 적용되리라 본다.

참 고 문 헌

- Chou S.K., Huang C.H., Chiang C.C., Huang P.C. 1998 "An inverse geometry design problem in optimizing the hull surfaces," Proc. 7th PRADS Symp., pp. 411-419.
- Chun H.H., Lee M.H., Loo Y.R., Jang H.S. 1997 "Calculation of the wave resistance of SWATH ships using rankine source panel methods," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 34, No. 2, pp. 27-38 (in Korean).
- Himeno Y., Tahara Y. 1998 "An application of computational fluid dynamics to tanker hull form optimization problem," Proc. 3rd Osaka Colloquium Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, pp. 515-531.
- Hino T., Kodama Y., Hirata N. 1998 "Hydrodynamic shape optimization of ship hull forms using CFD," Proc. 3rd Osaka Colloquium Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, pp. 332-340.
- Hirayama A., Equchi T., Kimura K., Fujii A., Ohta M. 1998 "Optimum hull form design using numerical wave pattern analysis," Proc. 7th PRADS Symp., pp. 421-428.
- Holtrop I.J. 1984 "A statistical re-analysis of resistance and propulsion data," International Shipbuilding Progress, Vol. 31, pp. 272-276.
- Hsiung C.C. 1981 "Optimal ship forms for minimum wave resistance," Journal of Ship Research, Vol. 25, No. 2, pp. 95-116.
- Hsiung C.C. 1984 "Optimal ship forms for minimum total resistance," Journal of Ship Research, Vol. 28, No. 3, pp. 163-172.
- Huan J., Huang T.T. 1998 "Sensitivity analysis methods for shape optimixation in non-linear free surface flow," Proc. 3rd Osaka Colloquium Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, pp. 457-483.
- 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.
- Kim H.J. and Chun H.H. 1999a "Design of 2-dimensional WIG section by a nonlinear ptpimization method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 3, pp. 50-59 (in Korean).

- Kim H.J. and Chun H.H. 1999b "Optimization of wing in ground effect craft," Proc. the Korean Society of Aeronautical and Space Sciences (in Korean).
- Kim S.E. Oct. 1991 "A study on the optimal forebody forms for minimum wave resistance," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 28, No. 2, pp. 28-39 (in Korean).
- Kim W. J., Van S.H. 1999 "Practical method for generating surface mesh using offset table," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 1, pp. 61-69 (in Korean).
- Sharma S.D. and Naegle J.N. 1970 "Optimization of bow bulb configurations of the basis of model wave profile measurements," Univ. Michigan, Dept. Nav. Arch. and Mar. Eng. Report No. 104.
- Toda Y., Stern F. and Longo J. 1991 "Mean-flow measurements in the boundary layer and wake and wave field of a series60 CB=0.6 ship model for froude number 0.16 and 0.316," IIHR Report No. 352, Iowa Institute of Hydraulic Research, The Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Vanderplaats G. N. 1984 "Numerical optimization techniques for engineering designs," McGraw-Hill, New York.



김희정



전호환