

CFD 를 이용한 선미선형 최적화 기법 개발

김희정^{†*}, 전호환*, 최희종*

부산대학교 조선해양공학과*

Development of CFD Based Stern Form Optimization Method

Hee-Jung Kim^{†*}, Ho-Hwan Chun* and Hee-Jong Choi*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.*

Abstract

In the present study, stern form optimization has been carried out using computational fluid dynamics (CFD) techniques. The viscous pressure drag has been minimized to optimize stern shape. Parametric modification function has been used to modify the shape of the hull. By the use of the parametric modification function and algebraic scheme to grid manipulation, the initial ship geometry was easily deformed according to change of design parameters. For purpose of illustration, KRISO 319K VLCC (KVLCC) is chosen for example ship to demonstrate stern form optimization. The numerical results indicate that the optimized hull yields a reduction in viscous resistance.

※Keywords: Optimization (최적화), CFD(계산유체역학), Stern form(선미형상)

1. 서 론

값비싼 모형시험의 횟수를 줄이기 위하여 선체 주위 유동해석은 선형설계 단계에서 활발히 사용되고 있다. 선형 설계자가 주어진 조건을 만족하여 설계된 초기 선형의 성능을 분석할 때나 설계 파라미터(Design Parameter)를 바꾸어가며 성능을 향상시킬 때에도 유동해석의 사용은 유용하다.

그러나 이 방법은 설계 전용 CAD 를 이용하여 설계 파라미터를 바꾸어 후보선형들을 도출해내는

반복적인 작업에 많은 시간이 소요된다. 따라서 최적화 기법을 이용한 자동선형 최적화 방법이 개발되어 반복적인 설계-검토작업을 좀더 체계적으로 시도하고 있다.

현재까지 선수 선형설계를 위하여 최적화 기법과 포텐셜 해석을 이용하였다(김희정과 전호환 2000, 최희종 등 2003, Markov and Suzuki 2001, Masuda and Suzuki 2001, Peri et al. 2001, Ragab 2001, Suzuki et al. 2004, Valkhof and Kooiker 2006). 포텐셜 기반 해석을 이용하면 비교적 빠른 선박의 조파저항을 추정하고 이를 최적화 하여 저항성능이 뛰어난 선수 선형 설계가 가능하다. 전산기가 발달함에 따라 CFD 해석

접수일: 2007년 7월 18일, 승인일: 2007년 11월 1일

† 교신저자: hijkim@pusan.ac.kr, 051-510-2757

방법의 연구가 활발해지면서 선형 설계에 CFD의 이용이 차츰 증가되어 CFD를 이용한 최적설계 기법도 시도되고 있다(Brizzolara 2004, Campana et al. 2006, Janson and Larsson 1996, Peri et al. 2005, Tahara et al. 2004). 최근에는 자유수면을 고려한 CFD 해석법을 이용하여 비교적 빠른 선박의 선수 형상 최적화에도 적용되어 차츰 설계에서의 활용 범위가 확대되고 있다(Jacquin et al. 2004).

선형 설계에 최적화 기법을 적용하기 위해서는 유동해석 이외에 최적의 선형을 효과적으로 찾는 최적화 기법과 선형 설계자가 일일이 후보 선형들을 만들어 내는 작업에 해당하는 선형변환기법이 필요하다. 최적화 기법은 크게 기울기 기반 최적화 기법과 확률론적 최적화 기법의 두 가지가 사용된다. 기울기 기반 최적화의 경우 수렴 속도가 빠르지만 국부 해의 가능성이 있고 확률론적 최적화 기법은 전역해의 가능성은 높지만 많은 계산을 수행해야 하므로 수렴속도가 느리다. 유동해석 시간이 빠를 경우 기울기 기반 최적화 기법을 사용하나 포텐셜 기반해석이나 CFD 해석의 경우 유동해석 시간의 제약으로 확률론적 최적화 기법은 제한적으로 사용되고 있다.

선형 최적화의 세가지 요소 중 전체 선형 최적화의 효율성에 많은 영향을 주는 선형변환기법의 연구는 초기에 유동해석을 위하여 선형을 표현할 때 사용하는 Spline의 조종점을 이용하다가 이후에는 기준선형에 변환함수를 이용한 변형량을 더하여 변환하는 방법이 주로 이용되고 있다. 그러나 실제 선형 설계자는 이러한 방법으로 형상을 변환하지 않고 성능에 영향을 주는 설계 파라미터를 기준으로 형상을 변형하여 성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석하는 최적화를 시도하고 있다. 이러한 방법을 모방한 파라메트릭 변환 방법은 설계변수의 수를 줄여줄 뿐 아니라 설계 파라미터 분석이 가능하여 최적화 기법의 실용성을 높여준다.

최근 선형 최적화를 위하여 선형변환기법을 사용하지 않고 형상 파라미터로 정의된 선형 설계

프로그램을 이용하여 선형을 정의하고 이 형상 파라미터를 직접 바꾸어 최적화를 하는 방법(파라메트릭 설계, Harries and Heimann 2003)도 소개되고 있지만 이 방법은 기존 선형을 형상 파라미터로 나타내는데 어려움이 있어 실용적으로 사용되지 못하고 있다.

이렇게 선형 최적화의 세가지 요소가 각각 좀더 정확하고 효율적인 방향으로 발달되어 점차 여러 분야에 다양한 방법으로 그 활용이 확대되고 있다. Suzuki et al.(2004)는 천수효과를 고려한 선형 최적화를 시도하였고, Chen et al.(2006)은 Inverse 최적화 기법을 이용하여 벌브형상 최적화를 발표하였다. Peri and Campana(2003)는 운동성능까지 고려한 최적화를 발표하였다. Brizzolara(2004)는 SWATH 선형 최적화에 이용하였고 Campana et al.(2006)는 Multihull 설계에도 이용하였다.

본 논문은 파라메트릭 변환함수를 이용한 실용적인 선미선형 최적화 기법에 관한 연구이다. 최적화 기법으로는 비선형 최적화 기법인 SQP 방법을 이용하고 유동해석은 CFD 해석을 사용하였다.

한편 설계자는 일반적으로 선형 가분의 원리를 이용하여 선수 형상은 조파저항의 영향을 고려하고 선미 형상은 형상저항과 선미후류 동시 고려하여 설계한다. 선미설계에 있어 고려되는 이 두 가지 성능은 불행히도 상반된 경향을 보이는 경우가 많다. 즉 형상저항을 최적화 할 경우 선미후류의 유속이 느려져서 나쁜 반류(Wake)분포를 보이게 되고 선미후류의 유속을 빠르게 할 경우 형상저항이 증가한다. 따라서 설계자는 대상선형의 목적에 맞게 형상저항을 최적화 하거나 혹은 선미후류의 유속을 빠르게 개선하게 된다. 본 논문에서도 저항과 선미후류에 관한 최적화를 각각 수행하였으며 그 경향을 분석하였다.

2. Geometry Modeling Method

Parametric modification function

Parametric modification 방법은 부분적 또는

Table 1 Design parameters for aftbody hull form optimization

Design Parameter	Symbol	Annotation
Cp curve	ΔX	Max. Movement
	x_c	Fixed Section
Section Shape	ΔY	Max. Movement
	z_0	DLWL
	z_1	Fixed Position
	y_1	Fixed Position
Transom	ΔZ	Transom Height

전체적으로 공식화된 형상 파라미터를 변화시켜 선형을 변환하는 방법이다. 선형 설계자가 직접 선형을 변경할 때는 성능에 영향을 주는 설계 파라미터를 기준으로 변경을 하게 된다. 이러한 개념을 선형 자동 변환에 적용한 것으로 설계 파라미터를 설계변수로 이용한다. 이 방법은 각각의 설계 파라미터가 목적함수에 미치는 영향을 분석할 수 있고 설계 파라미터를 독립적으로 다룰 수 있으므로 전체 또는 몇 개의 파라미터만을 가지고 최적화 수행이 가능하여 설계자가 사용하는데 편리하다. 그러나 설계 파라미터의 변화에 따른 선형의 변화를 결정해야 하는 어려움이 있으며 이것은 설계자에 따라 달라질 수 있어서 선형의 변화가 그에 종속적이게 된다. 또한 선택하는 설계 파라미터도 변환함수 개발자의 Know-How 에 의존해야 하는 단점도 있다.

선미설계를 위한 설계 파라미터를 Table1 에 나타내었고 설계자는 변환하고자 하는 영역과 제한조건에 따라 선택적으로 사용하게 된다.

Cp Curve Parametric Modification Function

횡단면적 곡선(Cp curve)의 파라미터 변환에 의해서 선미각(Run angle)을 변경하게 하는 설계가

가능하며 설계 변수를 Fig. 1 에 나타내었다. 설계 변수인 ΔX , x_c , x_0 and x_1 를 체계적으로 변환하여 선형을 생성하게 되며, 여기서 ΔX 는 Section 의 길이방향 최대 이동량이고 x_c 는 이동되지 않는 고정 Section 위치이다. x_0 , x_1 는 변환하는 시작과 끝 Section(횡단면)의 위치이다. 횡단면적 곡선이 변함에 따라 Section 의 위치가 이동되어 결국 횡단면적 곡선이 다른 선형을 도출 할 수 있다.

Section Shape Parametric Modification Function

Fig. 2 는 Section 형상 파라미터를 나타낸다. 선미 Section 형상은 두 가지 Type 의 U-V 변환으로 변경된다. 여기서 설계변수는 ΔY , z_0 , z_1 과 y_1 이다. 이다. ΔY 는 최대 변화량이며 z_1 , y_1 는 변하지 않는 위치이다.

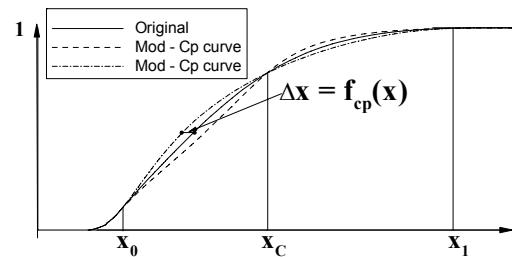


Fig. 1 Design parameters for Cp curve modification

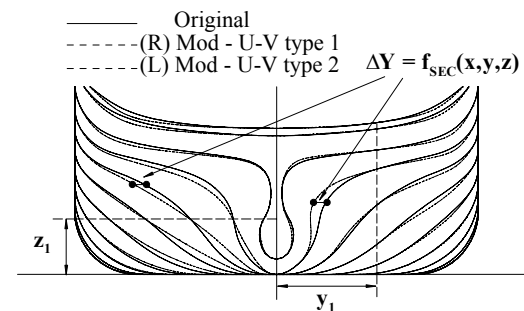


Fig. 2 Design parameters for aftbody section shape modification

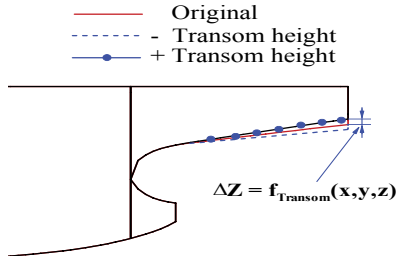


Fig. 3 Design parameters for transom height

Transom Height Parametric Modification Function

Fig. 3 은 트랜성 높이를 변화하는 형상 파라미터 이다. 여기서 설계변수는 AE 위치에서 최대 변화되는 높이인 ΔZ 이다.

3. Grid manipulation

파라메트릭 변환함수에 의하여 선형이 변환되면 변환된 선형에 맞추어 유동해석을 위한 그리드(Grid)를 생성하는 것이 필요하다. 이 방법은 Tahara et al(2004)가 발표한 Algebraic scheme 을 이용하여 구현하였는데 아래에 그 방법을 기술 하였다.

$$\begin{cases} x = x_0(\xi^1, \xi^2, \xi^3) \\ y = y_0(\xi^1, \xi^2, \xi^3) \\ z = z_0(\xi^1, \xi^2, \xi^3) \end{cases} \quad (1)$$

초기 생성된 Grid 를 (1)식처럼 표현하면 선체에 해당되는 부분은 아래 식과 같다.

$$\begin{cases} x = x_0(\xi^1, 1, \xi^3) \\ y = y_0(\xi^1, 1, \xi^3) \\ z = z_0(\xi^1, 1, \xi^3) \end{cases} \quad (2)$$

비슷한 방법으로 변형후의 선형은 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{cases} x = x_m(\xi^1, 1, \xi^3) \\ y = y_m(\xi^1, 1, \xi^3) \\ z = z_m(\xi^1, 1, \xi^3) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 ξ^2 는 선체표면과 수직인 방향이고 아래첨자 0 과 m 은 각각 초기와 변형후의 그리드를 나타낸다.

$$\begin{cases} x = x_0(\xi^1, \xi^2_{max}, \xi^3) \\ y = y_0(\xi^1, \xi^2_{max}, \xi^3) \\ z = z_0(\xi^2, \xi^2_{max}, \xi^3) \end{cases} \quad (4)$$

최적화가 진행되는 동안 선형은 변하지만 계산 영역의 경계는 동일하여야 한다. 아래첨자 max 는 변환된 선형이 유체장의 영역에 영향을 미치는 한 계를 나타낸다. 따라서 새롭게 변환된 그리드는 아래의 식을 이용하여 변하게 된다. 비록 이 방법이 비교적 단순하고 직접적이지만 변형후의 그리드는 초기생성된 그리드와 비슷한 수준으로 도출되었다.

$$\begin{cases} x = x_0(\xi^1, \xi^2, \xi^3) + (xm(\xi^1, 1, \xi^3) - x_0(\xi^1, 1, \xi^3))(1 - S^2(\xi^1, \xi^2, \xi^3)) \\ y = y_0(\xi^1, \xi^2, \xi^3) + (ym(\xi^1, 1, \xi^3) - y_0(\xi^1, 1, \xi^3))(1 - S^2(\xi^1, \xi^2, \xi^3)) \\ z = z_0(\xi^1, \xi^2, \xi^3) + (zm(\xi^1, 1, \xi^3) - z_0(\xi^1, 1, \xi^3))(1 - S^2(\xi^1, \xi^2, \xi^3)) \end{cases} \quad (5)$$

4. CFD module

본 논문에서 사용된 점성유동해석은 상용프로그램으로 널리 이용되고 있는 WAVIS(반석호 등 1998, Kim et al. 2002)를 사용하였다. 지배 방정식은 RANS(Reynolds-averaged Navier Stokes)식을 사용하고 난류모형은 Realizable k-ε model 을 채택하였다. 자유수면은 하나의 대칭 경계면으로 취급하여 조파현상은 고려하지 않았다.

Table 2 Principal particulars of KRISO 300K VLCC

Parameter	Ship	Model
Scale ratio λ	58.0	
Length L_{PP} (m)	320.0	5.5172
Breadth B (m)	58.0	1.0000
Depth D (m)	30.0	0.5172
Draft T (m)	20.8	0.3586
Block Coef. C_B	0.8098	0.8098
Reynolds No. R_N		4.6×10^6

5. Optimization Problem

본 연구를 위하여 개발된 최적화 프로그램의 타당성을 검증하기 위한 최적화 대상선형은 KRISO 에서 설계된 300K VLCC 선형이다. 아래 표에 주요 요목을 나타내었다.

설계변수의 선정

선체의 경우 선수부의 유동은 비교적 비점성 유동에 가까운 반면 선미부의 유동은 복잡한 점성 유동이 지배적인 관계로 본 연구에서는 선체 전 영역에 걸쳐서 선형 최적화를 수행하지 않고 점성 유동이 지배적일 것으로 생각되는 평행부를 제외한 선미부의 영역에 대하여서만 선형 최적화를 수행하였다. 설계 변수로 채택한 파라미터는 C_p 곡선상의 Run angle 을 변화하는 부분과 Section type 을 변화하는 두 가지로 두고 트랜섬은 고정하였다.

목적함수 및 제한조건의 설정

본 연구에서는 선형 최적화의 목적함수로 형상 저항과 프로펠러 위치에서 길이방향 속도 중에 캐비테이션과 선체진동에 영향을 많이 줄 것으로 고려되는 +45 도에서 -45 도 사이의 평균값을 사용하여 각각 최적화를 수행하였다. 형상저항은 Hino (2005)가 추천한 아래의 방법을 사용하였다.

$$1+k = (C_T)_{double\ model} / C_{FO}$$

$$\text{여기서 } C_{FO} = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (6)$$

(ITTC 1957 frictional coefficient) 이다.

평균속도 영역은 0 도에서 360 도 사이에서 설계 대상에 따라 설계자가 선택할 수 있게 되어 있다. 저속 비대선의 선미 형상설계는 저항감소를 위하여 형상저항을 목적함수로 둘 수 있으나 형상 저항의 감소는 일반적으로 프로펠러 유입속도를 저하시킨다. 따라서 설계자는 선형의 특성에 따라 최적화의 목적을 달리하여 사용하여야 한다. 본 논문에서는 목적함수를 형상저항과 프로펠러 위치에서 길이방향 속도평균 두 가지에 대하여 각각 선형을 최적화 하여 그 경향을 비교하여 보았다.

제한조건은 선형 최적화의 매 단계마다 초기선형과 비교하여 배수량이 같거나 또는 커져야 한다는 조건을 부과하였다. 실제 실용적인 선형 최적화에서 배수량 동일 조건이 적용되어야 하지만 배수량의 변화를 허용하지 않으면 최적화의 탐색이 원활하지 않아서 이와 같은 제한조건을 부과하게 되었다.

Parametric study results

계산에 사용된 격자는 $172 \times 40 \times 40$ (28 만여 개)의 격자를 사용하였다. 계산격자는 WAVIS 를 사용하여 선형의 비교분석을 위한 실용적인 격자수이고 격자 불확실성 분석 및 정성적인 경향 분석에 관한 내용은 김진 등(2005), 김우전등(2000) 와 Kim et al (2002)에 이미 발표되었다. 선형의 비교분석과, Reynolds number 는 실험을 수행한 환경과 동일하게 4.6×10^6 에서 계산하였다.

최적화 이전에 초기선형의 설계 파라미터 경향 분석(Parametric Study)을 수행하여 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 파라메트릭 변환함수를 이용하여 선형 최적화를 수행할 경우 이렇게 설계 변수에 대한 각각의 경향을 먼저 분석함으로써 최적도출 선형뿐 아니라 설계자에게 각각의 설계 파라미터의 경향까지 알려준다. 형상저항의 경우 설계 파라미터중 선미각(Run angle)의 영향이 가장 크다

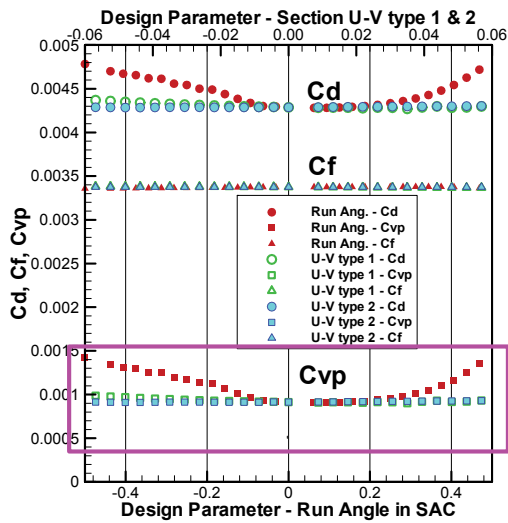


Fig. 4 Parametric study results with resistance

는 것을 알 수 있고 나머지 설계 변수의 영향은 상대적으로 작다. 따라서 선형설계 시에 선미각이 최적의 위치에서 벗어나면 형상저항은 급격히 늘어남을 알 수 있다.

최적화 결과

형상저항을 최소화한 최적선형을 최적선형 1 로 두고 반류 유속 평균속도를 개선한 최적선형을 최적선형 2 라고 하였다. 아래의 표에 두 가지 최적선형과 초기선형의 Main particular 와 두 가지 목적함수 값의 변화를 Table 3 에 나타내었다. 마찰저항(C_f)은 큰 변화가 없고 형상저항은 최적선형 1 의 경우 8%감소하고 반류속도가 16%느려졌다. 최적선형 2 는 반류속도가 34%가 빨라졌지만 형상저항은 12%증가하였다. 즉 주어진 목적함수에 해당하는 성능의 개선의 이루어져 해당 목적함수를 감소하는 최적화가 이루어진 것을 알 수 있다

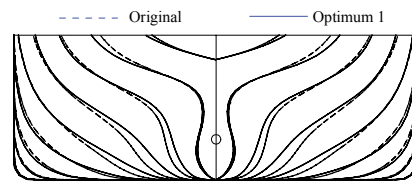
Fig. 5(a) 는 최적선형 1 의 정면도 모습이고 Fig. 5(b) 는 최적선형 2 의 정면도 모습이다. 초기 선형과 비교하여 최적선형 1 은 좀더 V 형상을 보이고 반대로 최적선형 2 는 초기선형에 비하여 U 형상을 보인다. 아래 Fig. 6 은 프로펠러 위치에서 반류분포를 보여준다. 반류분포를 목적함수로 사

용한 최적선형 2 의 유속이 향상된 것을 알 수 있다.

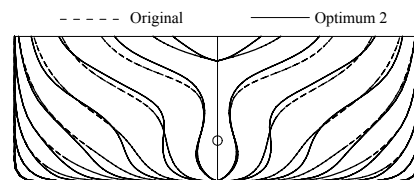
선미 설계시 고려되는 두가지 목적함수(형상저항, 반류속도)에 대하여 각각 최적화를 수행하고 최적선형을 도출하였다. 그러나 형상저항이 최적화된 선형의 경우 반류속도가 느려지고 반류속도를 빠르게 개선한 선형의 경우 형상저항이 나빠졌다. 이는 단일 목적함수를 사용하는 최적화 기법으로 인한 제한이며 향후 다목적함수를 고려한 최적화 기법을 도입하여 상반되는 두 가지의 목적함수를 모두 고려한 최적화를 수행할 계획이다.

Table 3 Hydrostatic data for KVLCC

	Original	Optimum1	Optimum2
Δ (m ³)	312450	311492	312745
W.S.A (m ²)	27653	27720	27705
$C_F \times 1000$	3.374	3.369	3.390
$C_{VP} \times 1000$	0.913	0.844	1.020
1+k	1.243	1.221	1.278
$C_F \times 1000$ (1957 ITTC)	3.450	3.450	3.450
V_{X_MEAN} (m/s)	0.32	0.27	0.43



(a) Original and Optimum 1



(b) Original and Optimum 2

Fig. 5 Comparisons of body plans

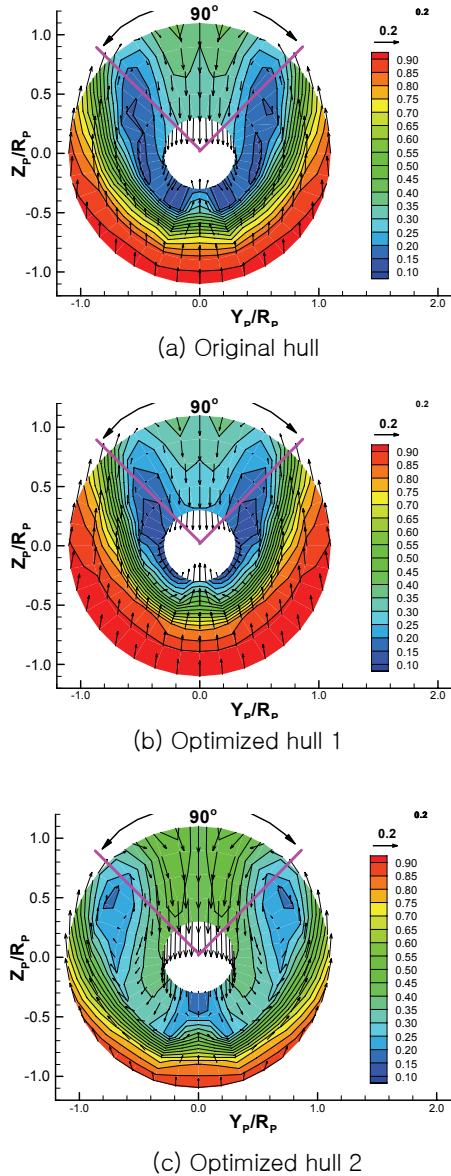


Fig. 6 Comparisons of Axial velocity contours at Propeller plan

6. 결론

파라메트릭 변환함수와 CFD 유동해석을 이용한 실용적인 선미선형 최적화 기법을 개발하였다. 개발된 최적화 기법을 저속선에 적용하여 최적선형을 도출하였다. 선미설계의 상반되는 경향을 보이

는 두 가지 목적함수에 대하여 각각 최적화를 수행하였으며 그 결과를 분석하였다. 설계 하고자 하는 대상선형의 특성에 따라 목적함수를 적절히 선택하여 최적화를 수행할 수 있으며 효과적인 선미선형 설계에 이용이 가능함을 보였다. 향후 다 목적함수 최적화 기법을 도입하여 짧은 시간 내 효과적으로 두 가지 이상의 목적함수를 고려할 수 있는 최적화 기법을 적용 할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 우수연구센터(ASERC)지원과제의 일부로 수행된 것으로, 위 기관의 후원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘주, 2000, "선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO 300K VLCC 모형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 3 호, pp. 11-20.
- 김진, 박일룡, 김광수, 반석호, 2000, "KRISO 컨테이너 및 VLCC 선형에 대한 RANS 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 6 호, pp. 593-600.
- 김희정, 전호환, 2000, "비선형 최적화 기법에 의한 최소 조파저항 선형 생성," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 11-18.
- 반석호, 김우전, 김도현, 임근태, 1998, "선형 평가용 수치계산 시스템 'WAVIS' 개발," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 199-202.
- 최희종, 서광철, 김방은, 전호환, 2003, "최소조파저항을 가지는 컨테이너선의 선형최적화기법에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 4 호, pp. 8-15.
- Brizzolara, S., 2004, "Parametric Optimization of SWAT-Hull Forms by a Viscous-Inviscid Free Surface Method Driven by a Differential Evolution Algorithm," 25th Symposium on Naval Hydrodynamics.

- Campana, E.F., Peri, D., Pinto A., Tahara Y., Kandasamy, M., Stern F., Cary C., Hoffman R., Gorski J. and Kennel C., 2006, "Simulation Based Design of Fast Multihull Ships," 26th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Chen, P.F., Huang, C.H., Fang H.C., Chou J.H., 2006, "An inverse Design Approach in Determining the Optimal Shape of Bulbous Bow With Experimental Verification", Journal of Ship Research, Vol. 50, No. 1, pp. 1-14.
- Harries, S. A. C. and Heimann, J., 2003, "From Redesign to optimal hull Line by means of Parametric Modeling," The Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering of the Technical University Berlin & FRIENDSHIP-Systems, COMPIT2003.
- Hino, T., 2005, Proc. of CFD Workshop Thkyo 2005, Tokyo, Japan.
- Jacquin, E., Derbanne, Q., Bellèvre, D., Cordier, S. and Alessandrini, B., 2004, "Hull Form Optimization Using a Free Surface RANSE Solver," 25 Symposium on Naval Hydrodynamics.
- 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, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2002, "Computational Study on Turbulent Flows around Modern Tanker Hull Forms," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 38, pp. 377-406.
- Markov, N.E. and Suzuki, K., 2001, "Hull Form Optimization by Shift and Deformation of Ship Sections," Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 3, pp. 197-204.
- Masuda, S and Suzuki, K., 2001, "Experimental Verificatin of Optimized Hull Form Based on Rankine Source Method," Journal of Soc. N.A., Japan, Vol. 236, pp. 27-33.
- Peri, D., Rossetti, M. and Compana, E.F., 2001, "Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques," Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 2, pp. 140-149.
- Peri, D. and Campana, E.F., 2003, "Multi-disciplinary Design Optimizatin of a Naval Surface Combatant," Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 1, pp. 1-12.
- Peri, D. and Campana, E.F., 2005, "High-Fidelity Models and Multiobjective Global Optimization Algorithms in Simulation-Based Design," Journal of Ship Research, Vol. 49, No.3, pp. 159-175.
- Ragab. S.A., 2001, "An Adjoint Formulation for Shape Optimization in Free-Surface Potential Flow," Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 4. pp. 269-278.
- Suzuki, K., Kai H. and Saha, G.K., 2004, "Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms in Shallow Water," Journal of Marine Science and Technology.
- Tahara, Y., Stern, F. and Himeno, Y., 2004, "Computational Fluid Dynamics-Based Optimization of Surface Combatant," Journal of Ship Research, Vol. 28, No. 4, pp. 273-287.
- Valkhof, H.H. and Kooiker, K., 2006, "Hull Form Design Optimization with the Aid of Computational Fluid Dynamics," Journal of Ship Research. Vol. 45, No. 2, pp. 140-149.



< 김희정 >



< 전호환 >



< 최희종 >