

Form Parameter Design 을 이용한 선형최적화

이연승^{†*}, 최영복^{*}

대우조선해양(주), 기본설계팀, 선형연구개발^{*}

Hull Form Optimization Based on Form Parameter Design

Yeon-Seung Lee^{†*} and Young-Bok Choi^{*}

Hydrodynamics R&D, DSME Co., Ltd. ^{*}

Abstract

Hull form generation and variation methods to be mainly discussed in this study are based on the fairness optimized B-Spline form parameter curves (FOBFC). These curves can be used both as indirect modification function for variation and as geometric entities for hull form generation. The flexibility and functionality of geometric control technique play the most important role for the success of hull form optimization. This study shows the hydrodynamic optimization process and the characteristics of optimum design hull forms of a 14,000TEU containership and 60K LPG carrier. SHIPFLOW has been used as a CFD solver and FS-Framework as a geometric modeler and optimizer.

※Keywords : Hull form optimization(선형최적화), Indirect modification function(간접변환함수), fairness optimized B-spline form parameter curve(FOBFC, 최적순경 B-spline 형상곡선), CFD(계산유체역학), Validation(검증)

1. 서론

선형최적화의 세가지 핵심기술은 형상표현 및 변환 기술, 유동장 해석기술 그리고 최적화 기술이다. 이들 단위기술들을 선형설계를 위한 적합한 도구로 시스템화하기 위해서는 단위기술의 효율적 이용뿐만

아니라 설계목적에 부합하는 설계경험과 실용적 설계방법의 반영 및 검증 또한 필수적이다. 특히 선형제어기술은 선형설계관점에서 최적화에 가장 중요한 영향을 미치는 기술로서 최적선형의 성능, 즉 선형최적화의 성공여부에 직접적인 영향을 준다. 본 연구에서는 fairness optimized B-spline form parameter curve (FOBFC)를 이용한 선형변환과 선형생성 방법을 중점적으로 논의한다. 본 방법은 모선으로부터 선형변환을 위한 변환함수로서의 역할과 선형생성을 위한 기하학적 단위기술로의 역할을 동시에 제공하

접수일: 2009년 7월 10일, 승인일: 2009년 10월 12일

† 교신저자: yslee132@dsme.co.kr, 016-550-4592

며 그 적용범위에 따라 부분 파라메트릭 디자인 (partial parametric design) 과 전구간 파라메트릭 디자인(full parametric design) 이 가능하다. 본 논문에서는 SHIPFLOW 와 FS-Framework 을 이용하여 14,000 TEU 컨테이너선 및 60K LPG 선의 유체역학적 선형설계개념과 최적화 결과를 논의한다 (Harries et al. 2006, Tahara et al. 2004, Larsson 1997, Friendship Systems 2007)

2. 선형변환 및 선형생성

2.1 FOBFC 를 이용한 선형변환

변환함수는 기하학적 형상의 변환 정도(degree of transformation)를 함수로 표현한 것으로 함수의 형태나 그 적용범위에 따라 설계형상의 다양성이 결정된다. 설계관점에서의 변환함수는 단순형상변환에만 관계하는 직접 변환함수와 설계제한조건을 포함하는 간접변환함수로 구분할 수 있다.

직접변환함수 : 독립적인 형상변환 함수로 복잡하고 다양한 형상제어가 가능하지만 변환 후 설계조건을 만족시키도록 반복수정이 요구되기 때문에 미소 국부형상변환에 주로 이용된다(Tahara et al. 2004)

간접변환함수 : 간접변환함수는 선형의 기하학적 제한조건을 포함한 형상변환 함수로 효율적 선형변환이 가능하다. 하지만 초기에 설계조건을 부여하여 설계목적에 맞는 수학적 관계를 찾아야 하는 어려움 때문에 변환함수 자체가 단순하고 선형변환에 제약이 많다. 간접변환함수 중 가장 단순한 형태로 선형의 종방향 단면적곡선(SAC) 변환에 이용된 예는 1-CP 법과 Lackenby 변환법이다. 1-CP 법은 선형식을, Lackenby 변환법은 2 차 다항식을 간접변환함수로 이용한 예이다. FOBFC 는 B-Spline 곡선을 이용하여 유도된 간접변환함수로 SAC 변환에 적용될 경우 CP, LCB, 중앙평행부 외에도 선박 성능상 중요한 선수부 물가름각(entrance angle) 이나 선미 측면도(stern profile) 등의 다양한 형상제어가 가능하다. 본 논문에서 이용된 FOBFC 를 도출하는 과정은 다음과 같다 (Nowacki and Kaklis 1998, Harries 1998).

- 8 개 정점(vertices)을 갖는 3 차 B-spline 곡선 $Q(t) = (x(t), y(t))$ 을 정의하고 이를 Table 1 에서와 같은 형상파라미터 들로 표현한다
- 설계제한조건을 만족시키는 간접변환함수를 유도하기 위해 최소 곡률변화를 갖는 B-spline 형상곡선(form parameter curve) 의 정점을 다음과 같이 최적화한다.

목적함수(Objective function) :

Minimize E_2

$$E_n = \int_{t_B}^{t_E} \left\{ \left(\frac{d^n x}{dt^n} \right)^2 + \left(\frac{d^n y}{dt^n} \right)^2 \right\} dt, \quad n = 2 \quad (1)$$

제한조건(equality constraints) :

$$h_i = FP_{i \text{ initial}} - FP_{i \text{ required}} = 0, \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, m$$

FP_i 는 Table 1 에서와 같은 형상파라미터 들이다. 식 (1), (2)로부터 형상파라미터와 라그랑지 상수를 갖는 라그랑지 함수 F 를 표현한다.

$$F = E_2 + \sum_{i=1, m} \lambda_i h_i = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서 m 은 제한조건으로 이용된 형상파라미터의 수이다. 정식화된 최적화 문제를 형상파라미터들과 라그랑지 상수로 각각 편미분하고 이로부터 생성된 비선형 문제를 풀면 원하는 FOBFC 변환함수의 정점들을 도출할 수 있다.

Table 1 Form parameters describing a planar curve.

	Beginning	End
Position	X_0, Y_0	X_1, Y_1
Tangent angle	α_0	α_1
curvature	K_0	K_1
Area	A	
Centroid of area	X_C, Y_C	

2.2 파라메트릭 디자인에 의한 선형생성

Fig. 1 에서 보여지는 바와 같이 형상파라미터

들로 표현된 FOBFC 를 이용하여 선형을 구성하는 각 종방향 기본곡선 및 단면곡선을 생성하고 이들 정보로부터 3 차원 곡면을 생성할 수 있다 (Nowacki and Kaklis 1998, Harries 1998, Lee et al.1995).

3 차원 선형생성을 위해 이용되는 종방향 기본곡선은 Table 1 의 형상파라미터 들로 표현된 형상곡선과 3 차원 곡면특성의 종방향 분포를 표현한 특성곡선으로 구성되며 Table 2 와 같다. Fig. 2 는 Table 2 의 기본곡선들로부터 생성된 전구간 파라메트릭 디자인의 한 예를 보여주고 있다.

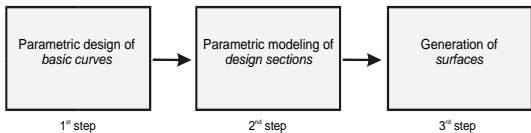


Fig. 1 Surface based hull form generation by means of the full parametric design

3. FOBFC 변환함수를 이용한 초대형 컨테이너 운반선의 SAC 최적화

포스트 파나막스급 컨테이너 선박의 규모는 1990 년대 초반부터 지속적으로 증가하여 현재 운항중인 컨테이너선은 14,000 TEU 급에 이르고 있다. 이러한 초대형 컨테이너 선박은 연료효율의 극대화에 따른 경제운항을 위해 점점 비대화 및 저속화되고 있는 추세이며 그 설계에 있어서도 기존 파나막스급 고속 세장선의 설계개념과 구분되는 FN=0.2 영역대의 새로운 선형설계 개념을 필요로 한다. 본 논문에서는 이러한 선박의 전반적인 선형검토를 위해 볼륨분포곡선(SAC) 상의 물가름각, 선수미 어깨(shoulder) 형상, 중앙평행부 길이 및 위치 등과 같은 국부형상 및 변환구간 등의 제어가 가능한 FOBFC 를 유도하고 이를 통한 체계적인 선형변환을 시도하였다. 세부적으로는 변환함수를 구성하는 각 FOBFC 파라미터들로 생성된 SAC 의 형상변화와 성능간의 민감도를 조사하고 이로부터 최적화 문제를 정식화 한 후 최적 SAC 를 결정하는 변환함수를 도출하였다(Harries et al. 2006). 선수미 단면형상 및 벌브형상 등에

따른 다양한 모션을 결정하고 각각에 대한 SAC 최적화를 수행하였으며 여기서는 SAC 변환에 관계되는 부분만을 언급하도록 한다.

Table 2 Basic curves describing hull form

	Curve	Symbol
Position	Design waterline	DWL
	Flat of side curve	FOS
	Center plane curve	CPC
	Flat of bottom curve	FOB
	Deck	DEC
Tangent angle	Tangent angle at Beginning	TAB
	Tangent angle at End	TAE
Curvature	Curvature at Beginning	CAB
	Curvature at End	CAE
Area	Sectional area curve	SAC
Centroid of area	Vertical moments of sectional area	VMS
	Lateral moments of sectional area	LMS

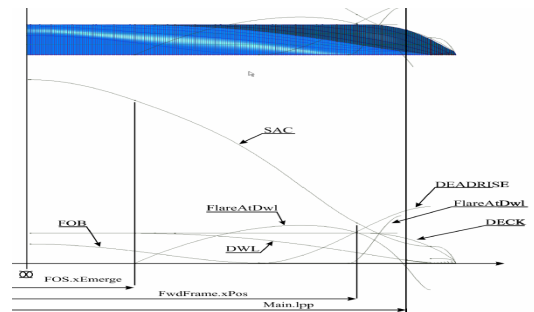


Fig. 2 Full parametric design based on basic curves

3.1 FOBFC 파라미터의 민감도 조사

1 차 모션의 SAC 에 적용된 FOBFC 변환함수의 민감도 해석이 Table 3 의 변환함수 파라미터들의 체계적 변환을 통해 수행되었다. Fig. 3 에서 볼 수 있는 바와 같이 SAC 의 각도 변화와 조파저항 성능은 함수적인 관계를 갖는다. 특히, 선수부 SAC 물가름각(Entrance angle) $\delta \alpha_{OE}$ 의 변화가 성능

변화에 미치는 영향이 가장 크며 모선으로부터 중앙평행부 길이가 증가하고, 그 위치가 선미쪽으로 옮겨갈수록 조파저항은 감소한다.

$$\begin{aligned}
 & -20 \leq \delta\alpha_{0E} \text{ (deg ree)} \leq 30 \\
 & -10 \leq \delta\alpha_{1E} \text{ (deg ree)} \leq 0.0 \\
 & -10 \leq \delta\alpha_{0R} \text{ (deg ree)} \leq 10
 \end{aligned}$$

Table 3 Form parameter variation range

	FPBFC parameter
선수부 (Entrance)	$\delta X_{0E}, \delta X_{1E}$ (Station)
	$\delta \alpha_{0E}, \delta \alpha_{1E}$ (degree)
선미부 (Run)	$\delta X_{0R}, \delta X_{1R}$ (Station)
	$\delta \alpha_{0R}, \delta \alpha_{1R}$ (degree)
	δX_C (%Lpp)

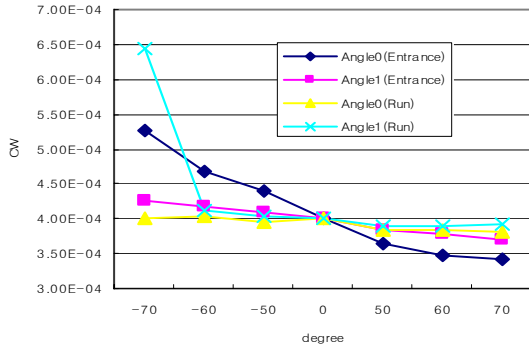


Fig. 3 C_w with respect to the tangential angle variation of SAC (Entrance and Run)

3.2 SAC 최적화

변환함수 파라미터의 민감도 해석을 통해 다양한 SAC 형상에 따른 성능특성 및 유효설계구간 (feasible design range)을 정하고 1 단계로부터 도출된 선형을 2 차 모선으로 선정한 후 아래와 같은 최적화 문제를 정식화하였다. 최적화 기법으로 Tangent Search Method 를 이용하였다.

목적함수 : Minimize C_{wcut}

설계변수 : $\delta X_C, \delta X_{0E}, \delta \alpha_{0E}, \delta \alpha_{1E}, \delta X_{0R}, \delta \alpha_{0R}$

제한조건 : $-1 \leq \delta X_C \text{ (% LPP)} \leq 1$
 $-6.175 \leq \delta X_{0E} \text{ (m)} \leq 6.175$
 $-6.175 \leq \delta X_{0R} \text{ (m)} \leq 6.175$

최적 변환함수 파라미터로부터 생성된 최적 SAC 를 2 차 모선과 비교하면 최적선형은 SAC 및 DWL 의 입사각이 매우 작고 벌브 볼룸 역시 감소 되었으며 중앙평행부 길이가 증가된 형태를 갖는다. 특이한 점은 SAC 최적 선수볼룸분포는 DWL 의 최적 선수 입사각에 가장 큰 영향을 받으며 이와 같은 저속비대형 컨테이너선의 LCB 영향은 상대적으로 적어 보인다는 것이다. 즉 임의의 LCB 에서 SAC 를 최적화하면 최적 DWL 을 갖는 SAC 로 수렴하며 다른 선형특성을 갖는 비슷한 성능의 선형을 도출할 수 있다.

Fig. 4 에서는 2 차 모선과 최종 도출선의 파형을 비교하였고, Fig. 5 는 최종도출선의 HSVA 모형 시험 장면이다. Fig. 6 에서는 HSVA 에서 시험된 유사선의 성능과 최종도출선의 성능을 전저항 성분으로 비교하였다. 설계속도인 24.0 knots 주위에서 최종도출선의 저항이 현저하게 낮은 것을 알 수 있다.

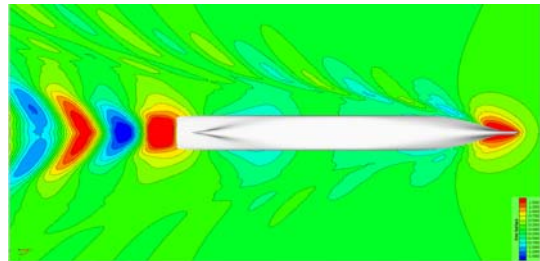


Fig. 4 Wave contour of two hull forms(initial hull& optimized hull form) at 24.0 knots



Fig. 5 Model test of optimized hull form at 24.0 knots

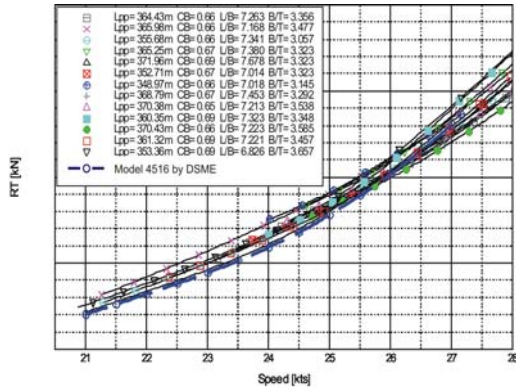


Fig. 6 Comparison of designs on the basis of HSVA's database

변환함수를 이용한 SAC 최적화는 단면타입이나 벌브와 같은 형상자체의 제어가 어렵기 때문에 모선의 영향을 크게 받는, 극히 제한된 변환방법이라 할 수 있으나 주로 초기 개념설계 단계에서 빠르고 쉽게 선형도출이 가능한 효율적인 방법이 기도 하다. 본 연구에서 수행된 14,000 TEU 초대형 컨테이너 운반선의 SAC 최적화는 FOBFC 를 이용하여 조파저항 관점에서 수행되었으며 위와 같은 간단한 변환만으로도 보증속력 대비 높은 속도성능을 갖는 선형을 도출할 수 있었다.

4. 전반적 파라메트릭 디자인을 이용한 60K LPG 선의 선수형상최적화

LPG 선은 설계흘수(design draft) 와 밸러스트 흘수(ballast draft) 및 스캔틀링 흘수(scantling draft) 조건에서의 속도 성능이 모두 중요하다. 따라서 계약 시 최소한 두 가지 운항조건에 대한 보증속도를 요구하고 있어 선형설계 관점에서는 까다로운 선종이라 할 수 있다. 본 연구에서는 기존 DSME STD 60K LPG 선의 밸러스트 흘수조건외의 속도성능향상을 위해 선형의 다양한 변환이 가능한 전반적 파라메트릭 디자인을 이용하여 선수형상 최적화를 수행하였다(Harries and Abt 1999, Friendship Systems 2007). DSME 기존 60K LPG 선의 주요치수는 Table 4 와 같다.

Table 4 Principal particulars of DSME 60K LPG Carrier

	Design Cond.	Ballast Cond.
Fn	0.191	0.194
CB	0.7500	0.7048
T (m)	10.8	5.6/7.8
WSA (m2)	8598.7	6637.8
Disp.(m3)	50857.3	29649.4

4.1 선수선형 최적화 문제 정식화

LPG 선의 운항특성에 따라 설계 및 밸러스트 흘수조건외의 저항성능을 동시에 고려할 수 있도록 아래와 같은 최적화 문제를 정식화하였다.

목적함수 : Minimize OF

$$OF = \frac{2}{3} R_{Tratio(B)} + \frac{1}{3} R_{Tratio(D)} + penalties$$

$$R_{Tratio} = R_{T(NewHullForm)} / R_{T(ExistingHullForm)}$$

$$R_T = R_{WP} + (1+k)R_{FITTC} + R_A + \Delta R_T + R_{AA}$$

제한조건 :

- 4 개의 선수 frame 에서의 폭 제한
- 배수량 변화는 ±3% 이내

기존선형대비 전달마력 3% 감소를 목표로 하였으며 설계흘수조건외의 속도성능을 유지해야 하고 LPG 선수폭에 대한 제한조건이 있다. 따라서 기존 선형의 저항성능을 기준으로 전저항비 R_{TRATIO} 를 정의하여 기존선 대비 성능변화 추이를 정성적으로 모니터링할 수 있게 하였다. (B) 와 (D) 는 각각 밸러스트 흘수조건 및 설계 흘수조건을 나타내며 각 흘수조건에 대한 가중치는 최적화 목적에 따라 임의로 분배하였다. 탱크 폭에 대한 제한조건을 목적함수에서 고려하기 위해 가중치 (Penalties)를 도입하였다.

4.2 최적화 과정

두 단계의 최적화가 수행되었다. 먼저 선수선형을 구성하는 기본 및 특성곡선들의 파라메터 약 26 가지를 설계변수로 정의하고 각 변수들의 실험

계획법(DoE)에 의한 조합 약 500 개에 대한 민감도를 두 가지 흘수조건(design and ballast draft condition)에 대해 각각 수행하였다. Fig. 7 은 두 가지 흘수조건에서 모두 저항이 감소하는 유효설계구간(feasible design range)을 보여준다. 이후 민감도가 큰 밸브형상 및 DWL 파라미터, 그리고 이들의 변화에 따라 종속적으로 변하는 SAC 파라미터들로 최적화 문제를 재정의하고 Tangent Search Method 를 이용하여 밸브 주위 국부형상 최적화를 수행하였다. 각 변환선형들이 수렴과정을 Fig. 8 에서 밸러스트 흘수조건에서의 기존성능대비 전저항비로 보여주고 있다.

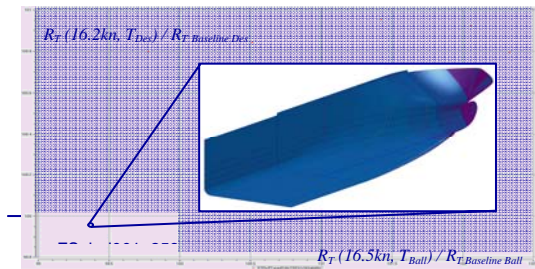


Fig. 7 Feasible designs



Fig. 8 History plot of objective function at the ballast condition

4.3 최적선형 및 결과

3000 번 이상의 반복과정을 통해 최종적으로 선정된 선형은 Fig. 9(b) 와 같으며 이 두 선형의 밸러스트 흘수조건에서의 파형은 Fig. 10 과 같다. 선수벌브의 형상과 프로파일이 기존의 LPG 벌브타입과 매우 다르며 오히려 컨테이너선에 유사한 형태로 도출되었다. 선체 선저부의 볼륨이 크게 감소하였고 설계흘수 주위 볼륨은 상대적으로 증가하였다.

두 선형의 성능비교시험은 Moeri 메인수조에서 동시에 수행되었으며 계산(CFD) 및 2D 해석법에 의한 모형시험결과(EFD)로 검증된 두 선형의 성능차이를 Table 5 에서 비교하였다. 밸러스트 흘수조건에서 기존성능대비 실선의 전저항(R_{TS}) 5.7%, 전달마력(P_D) 7.8% 향상을 볼 수 있었다.



Fig. 9 Initial design and Optimum design

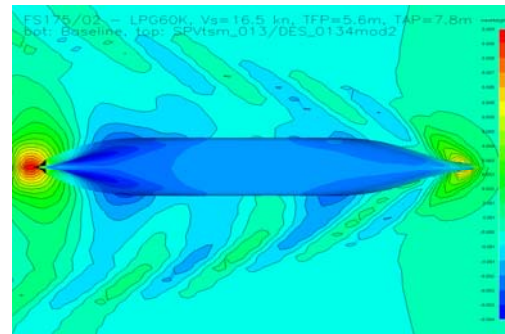


Fig. 10 Wave contours at 16.5 knots and ballast draft condition (top: optimized hull form, bottom: existing hull form)

Table 5 Improvements in performance characteristics

	Design cond. (% Diff.)		Ballast cond. (% Diff.)	
	CFD	EFD	CFD	EFD
WSA	-1.06		-1.20	
Disp.	-0.36		-0.99	
RTs	-0.98	0.74	-1.75	-5.70
PD		-0.50		-7.79
CR		5.38		-10.08
CTs		1.81		-4.54
RTM		-0.99		-4.22

% Diff. = (Optimized-Existing)/Existing*100

5. 결론

1. FOBFC 를 이용한 SAC 변환은 비교적 형상 자체의 제어가 자유로우며 어떤 형상파라미터 값들의 변화에 대해서도 제한조건을 만족하는 SAC 를 제공한다. 이와 같이 최적화를 이용한 변환함수의 정의는 다양한 형태의 수학적 함수에 적용될 수 있을 뿐 아니라 설계 제한조건을 만족하는 변환함수 도출을 자동화 할 수 있기 때문에 설계경험을 반영한 설계자 고유의 변환함수를 생성하는데 쉽게 이용될 수 있다. 초기 개념설계단계에서는 모선의 특성을 유지하면서 빠르게 성능 및 설계조건을 만족시켜주는 간접변환함수를 이용한 선형최적화가 유용하다.

2. 형상파라미터를 이용한 전구간 파라메트릭 디자인 방법은 선형모델링 및 선형제어가 어려운 단점이 있지만 선형을 생성하는 형상 파라미터들이 모두 설계변수로 이용될 수 있기 때문에 선형제어의 유연성이 높고 전체형상 및 국부형상 제어 모두 가능하다. 성능향상 기대치에 따라 최적화 작업이 방대해 질 수 있으나 신선형 개발이나 성능향상이 크게 요구된다면 전구간 파라메트릭 디자인을 기반으로 최적선형화 작업을 수행해야 한다.

선형최적화는 설계자의 설계목적, 설계기간 및 설계용도에 따라 다양한 방법으로 정식화 될 수 있으며 또한 선형제어기법, 최적화 기법 및 성능해석방법의 선택과 함께 최적화 문제를 정식화하는 방법에 따라 도출선형의 형상과 성능에는 큰 차이가 있다. 선형최적화 역시 결국은 설계자의 경험과 판단능력에 따라 차별되는 설계기술이며 이러한 기술을 보다 높은 차원에서 운용하는 것이 설계자의 몫이라 하겠다.

참 고 문 헌

- Friendship Systems, 2007, Hydrodynamic Optimization of the DSME 60K LPG Carrier, FS-

Report 175-02-01.

- Harries, S., 1998, Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms, Ph.D. Thesis, Institut fuer Schiffs-und Meerestechnik, Technische Universitaet Berlin, Mensch & Buch Verlag, Berlin.
- Harries, S. and Abt, C., 1999, " Formal Hydrodynamic Optimization of a Fast Monohull on the Basis of Parametric Hull Design," 5th International Conference on Fast Sea Transportation, Seattle, WA, USA.
- Harries, S., Abt, C., Heimann, J. and Hochkirch, K., 2006, " Advanced Hydrodynamic Design of Container Carriers for Improved Transport Efficiency," International Conference on Design & Operation of Container Ships, RINA, London.
- Larsson, L., 1997, SHIPFLOW User' s manual and theoretical manual, FLOWTECH Int. AB, Gothenberg.
- Lee, Y.S., Kim, S.Y. and Kang, K.T., 1995, " Hull Form Generation by Using TSK Fuzzy Model," Fuzzy Logic and its Application, Information Science and Intelligence Systems.
- Nowacki, H. and Kaklis, P.D. (Eds.), 1998, " Creating FAIR and SHAPE-Preserving Curves and Surfaces," Berlin/Potsdam, B.G.Teubner, Stuttgart.
- Tahara, Y., Stern, F. and Himeno, Y., 2004, " CFD-Based Optimization of a Surface Combatant," J. Ship Research, Vol. 28, No. 4, pp. 273-287.



< 이 연 승 >

< 최 영 복 >