



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

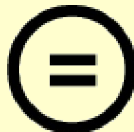
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

CFD를 이용한 Flow Control Fin의 최적설계



2011년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

조선해양시스템공학과

위 다 열

공학석사 학위논문

CFD를 이용한 Flow Control Fin의 최적설계

지도교수 김 동 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2011년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

조선해양시스템공학과

위 다 열

위다얼의 공학석사 학위논문을 인준함.

2011년 8월

주 심 공학박사 김 용 직 (인)

위 원 공학박사 김 동 준 (인)

위 원 공학박사 신 상 목 (인)



목 차

Abstract	i
1. 서론	1
2. 대상선박 및 수치해석	3
2.1 대상선박의 선정	3
2.2 좌표계 및 수치해석 방법	5
2.3 수치해석의 결과	8
3. Flow Control Fin(FCF)의 설계	10
3.1 FCF의 제원	10
3.2 FCF 초기 위치	11
3.3 FCF와 FCFP의 비교	13
4. 최적화	15
4.1 설계변수	16
4.2 목적함수	18
4.3 응답 표면(response surface) 생성	20
5. 최적화 해석 결과	22
5.1 점성저항 최적화	23
5.2 반류분포 최적화	26
5.3 점성저항과 반류분포의 다목적 최적화	29
6. 결론	34
참고문헌	35



The Design Optimization of a Flow Control Fin Using CFD

Daeol Wie

Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering,
The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

In this paper, the Flow Control Fin (FCF) optimization has been carried out using computational fluid dynamics (CFD) techniques. This study focused on evaluation for the performance of the FCF attached in the stern part of the ship. The main advantage of FCF is to enhance the resistance performance through the lift generation with a forward force component on the foil section, the propulsive performance by the uniformity of velocity distribution on the propeller plane. This study intended to evaluate these functions and to find optimized FCF form for minimizing viscous resistance and equalizing wake distribution. Four parameters of FCF are used in the study, which were angle of FCF, longitudinal location, transverse location, and span length in the optimization process. KRISO 300K VLCC2 (KVLCC2) is chosen for an example ship to demonstrate FCF for optimization. The optimization procedure was considered using genetic algorithms (GAs), a gradient-based optimizer for the refinement of the solution, and Non-dominated Sorting GA-II (NSGA-II) for Multiobjective Optimization. The results showed that the optimized FCF could enhance the uniformity of wake distribution at the expense of viscous resistance.

1. 서론

선박의 이산화탄소 배출 규제 실행과 연료 가격의 상승에 의해 친환경선박이 주목을 받고 있다. 선박의 에너지 효율 향상을 통한 친환경선박의 방법은 선형개선, 추진시스템 개선, 기계장치의 개선, 효율적 운항, 온실가스 배출량 평가시스템으로 분류 할 수 있다. 선형개선은 밸러스트 최소화, 선수부 및 선미부 형상 최적화, 선미 수선 연장이 있으며 추진시스템 개선은 상반회전 프로펠러, 프로펠러-선체 간섭효과, 추진 보조 장치가 있다. 기계장치 개선은 디젤 전기추진장치, 전력분배시스템 최적화, 육상전원 공급장치가 있으며 효율적 운항은 저속운항 및 정 RPM운전, 선적상태 최적화, 선체 및 프로펠러 표면 보수 유지가 있다. 온실가스 배출량 평가시스템은 선박종류-운항항로-운항상태에 따른 에너지 효율 평가, 해양환경을 고려한 실효역 시운전 속도 해석 기법 확립을 들 수 있다.

조선 산업에서는 에너지 효율 향상을 위하여 우수한 저항 성능을 가진 선형을 개발하거나 선체표면에 부가물을 부착함으로써 선형의 유체 역학적 성능 향상을 통하여 에너지 절감의 효과를 보고자 하는 것이 대부분이다.

Lee et al.(2004)은 40,000 톤급 정유 운반선에 와류 생성기(vortex generator)를 부착하여 반류분포를 변화시켜 속도 성능을 개선시키는 방법을 제시하였다. Jang et al.(2006)은 CFD기법을 활용하여 와류 생성기를 설계하고 모형시험을 통하여 실선에서의 속도 및 캐비테이션 성능을 확인하였다.

Choi et al.(2009)은 KCS선형에 유동제어판을 부착하여 선체에 미치는 영향을 유체역학적 관점에서 연구하였다. 평판의 제원은 Span Length를 4개, Cord Length를 3개의 변수를 설정하여 수행하였고, 부착 위치는 길이방향으로 5st, 흘수방향으로 3st으로 설정하여 수행하였다. 유동제어판을 부착하였을 때 선체의 자세와 조파저항계수의 변화를 확인하였고, KCS 선박의 경우 선수트림이 발생하여 조파저항계수가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Yoon et al.(2009)은 유동제어판(Flow Control Plate)의 효과를 활용하여 저항과 추진 성능의 향상을 확인하였다. KCS 선박에 조파저항 계수관점에서 가장 우수한 길이방향위치와 Cord×Span의 제원을 선정하고 흘수 방향으로 3가지 위치에 유동제어판의 숫자와 각도는 0° , 10° 의 조합으로 7case를 수행하여 반류분포를 확인하였다. 한 개의 평판, S.C.H(Shaft Center Height), 10° 에서 형성 되는 것이 적절하다고 판단하였다.

Lee and Kim(2011)은 Wake Equalizing Duct을 부착하여 선체 저항 변화와 반류 분포 변화를 확인하였다. 최적화 기법을 이용하여 저항과 반류분포의 관점에서 최적화를 수행하였다. 다목적 최적화 알고리즘을 이용한 수치해석 결과는 점성압력저항의 감소와 추력에 의해서 점성저항성능은 향상되었으나, 반류 분포의 불균등 정도가 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 선미 유동 제어 장치로서 Flow Control Fin(이하 지면에서는 FCF으로 표기하겠음)을 부착하여 선미에서 추력을 발생시키고 반류를 균등하게 하여 선체 저항 변화와 공칭반류의 변화를 확인하고자 한다. 그리고 점성저항과 반류 분포의 향상을 목적으로 하는 FCF의 최적설계를 수행하였다. KVLCC2를 대상선박으로 사용하였으며 수치해석은 상용 유동해석 프로그램인 CFX를 사용하였다. 그리고 최적화는 Ansys 12의 GDO(Goal Driven Optimization)을 사용하였다. FCF의 선형, 부착 위치, 부착 각도를 알기 위하여 설계변수를 설정하고 점성저항과 반류분포를 목적함수로 하여 FCF을 이용한 에너지 효율향상 선박을 설계하고자 한다.



2. 대상선박 및 수치해석

2.1 대상선박의 선정



Fig. 2.1 KRISO 3600TEU Container Ship (KCS)



Fig. 2.2 KRISO 300K VLCC (KVLCC2)

프로펠러평면에 유입되는 유동장 내부에는 선미만곡부에서 생성된 종방향 와동, 점성에 기인하는 박리유동, 선체 주위를 지나는 포텐셜유동 등, 유속과 방향이 다른 다양한 유동이 복합적으로 포함되어 있다. 이러한 각각의 유동은 선박의 종류, 선속, 그리고 선박의 형상에 따라 달라지므로 프로펠러에 유입되는 유동성분 또한 달라진다.

KCS(Fig. 2.1)는 MOERI(구 KRISO)에서 설계되었고 모형실험 결과가 공개되어 있는 KRISO 3600TEU Container Ship (KCS)이다. KCS의 주요제원은 수선간 길이(L_{pp})가 230m, 폭(B)이 32m, 흘수(T)가 10.8m이며 방형비척계수(CB)는 0.651이다. KCS는 컨테이너선으로서 유조선이나 산적화물선 등의 저속비대선과 달리 속도가 빨라 전체저항에서 조파저항이 차지하는 비중이 큰 배이다. 따라서 선형설계에 있어서 조파저항과 관계가 있는 선수부의 제반요소를 최적화시키는 관점에서 설계해야 한다.

KVLCC2(Fig. 2.2)는 MOERI(구 KRISO)에서 설계되었고 모형실험 결과가 공개되어 있는 KRISO 300K VLCC (KVLCC2)이다. KVLCC의 주요제원은 수선간 길이(L_{pp})가 320m, 폭(B)이 58m, 흘수(T)는 20.8m이며 방형비척계수(CB)는 0.8098이다. KVLCC2는 저속비대선으로서 선수부의 영향을 받는 조파저항보다는 선미부와 민감하게 관련된 점성저항이 전체저항의 90%이상을 차지한다. KVLCC2는 LCB가 중앙단면 앞쪽에 뒹에도 불구하고 선미부가 여전히 비대한 상태이기 때문에 선미만곡부에서는 만곡부와류가 생성되고, 선미단에서는 박리현상이 발생한다. 만곡부와류와 박리에 의한 저항증가와 발류의 불균등정도가 크기 때문에 FCF의 성능을 확인하기에 적합하다고 판단하였다.

Fig. 2.3은 KCS와 KVLCC의 반류분포를 나타낸 것이다. 공통적으로 6시 방향에서 고속구간을 나타내며 중앙부분과 12시 방향에서 저속구간을 나타내고 있다. KCS에 비해 KVLCC2의 반류분포가 중앙부분의 저속구간의 면적이 넓게 분포하고 있으며, 12시 방향에서도 넓은 저속구간을 형성하고 있다. 그러므로 KCS보다 KVLCC2의 반류불균등 정도가 크다는 것을 확인하였다. 본 연구는 KVLCC2의 1/58의 축척비를 가지는 모형시험과 동일한 조건에서 수치계산을 수행하였다. Table 1는 KCS와 KVLCC2의 기본 제원을 나타내었다.

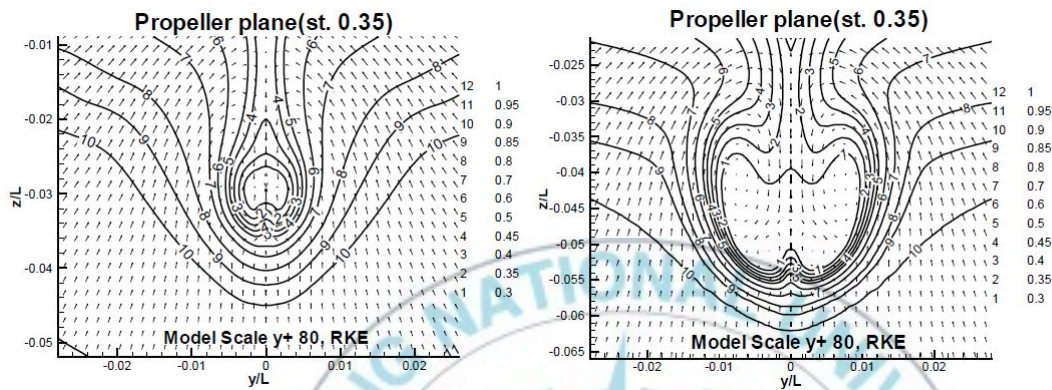


Fig. 2.3 Wake field of KCS and KVLCC (Left: KCS, Right: KVLCC2)
(Kim et al, 2010)

Table 1 Principal particulars of KVLCC2 and KCS

	KCS	KVLCC2	KVLCC2 Model
scale		58.0	
Lpp(m)	230	320	5.5172
B(m)	32.0	58.0	1.0000
T(m)	10.8	20.8	0.3586
D(m)	19.0	30.0	0.5172
CB	0.651	0.8098	0.8098
S.C.H. (m)	4.1	5.8	0.1
Fn	0.260	0.1423	
Rn			4.6×10^6
U(kn)	24.0	15.5	1.047(m/s)

2.2 좌표계 및 수치해석 방법

본 수치계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 2.4에서 보는 바와 같이 선체 길이 방향을 x축, 폭 방향이 y축, 연직 상방향이 z축으로 하는 직교 좌표계를 사용하였다. 좌표계의 원점은 선체 중심면과 중앙면 그리고 자유표면이 만나는 점을 잡았다.

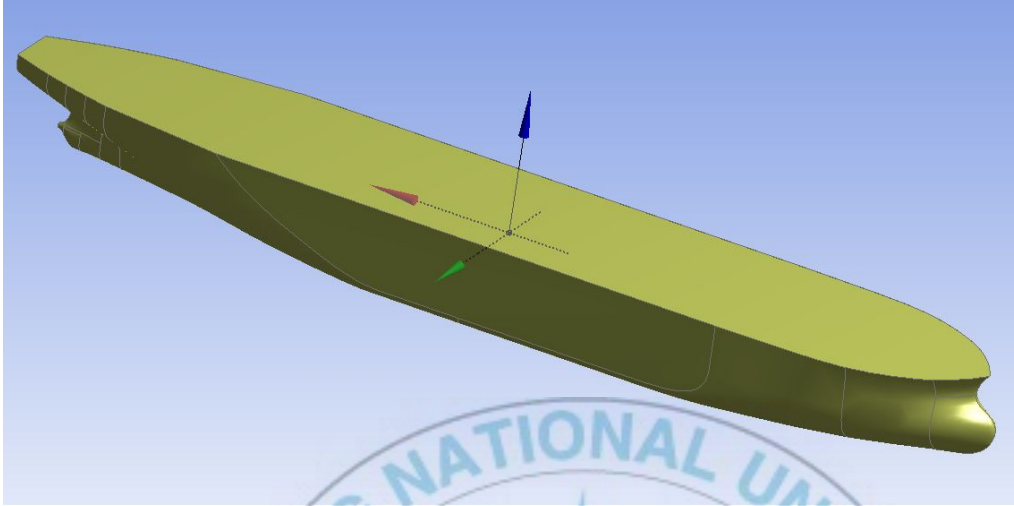


Fig. 2.4 Coordinates system

본 연구에서는 대상 유체를 비압축성 유체로 가정하고 지배방정식으로는 운동량 이송식에 대하여 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 식을, 그리고 질량보존을 위해 연속방정식을 정식화하였다.

모든 식은 속도(U), 선체길이(L), 그리고 밀도(ρ)로 무차원화하였다. 연속 방정식과 운동량 이송방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

여기서 $u_i(u, v, w)$ 는 $x_i(x, y, z)$ 방향의 평균 속도 성분을 나타내고, p 는 압력을 나타낸다.

τ_{ij} 는 점성과 난류에 의한 유효응력을 나타내며, 유효응력은 Boussinesq의 isotropic eddy viscosity model을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} = \nu_e \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2.3)$$

여기서 k 는 난류의 운동에너지이고, ν_e 는 turbulent eddy viscosity ν_t 에 유체의 운동학적 점성계수 ν 를 합한 유효점성계수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nu_e = \nu_t + \frac{1}{Rn} \quad (2.4)$$

난류 모형은 k - ϵ 모형을 사용하였다.



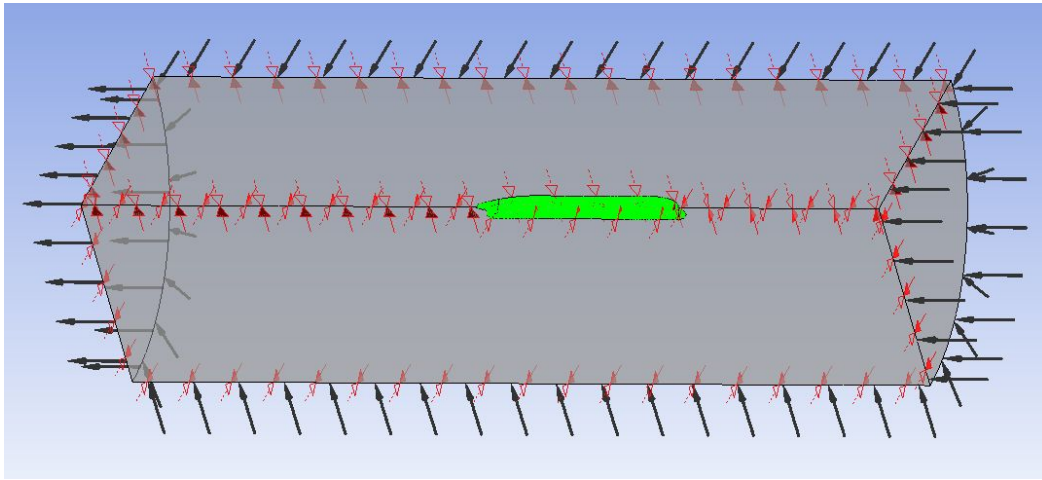


Fig. 2.6 Computational domain

난류유동의 지배방정식은 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Eqn.과 연속 방정식이며, 수치계산을 위한 격자는 Unstructured hybrid로 tetrahedral로 전체적인 격자를 구성하고 있으며 경계층 구현하기 위하여 Prism을 사용하였다. Domain의 경계조건은 유입경계는 FP로부터 1Lpp, 외부경계는 현측으로부터 1.1Lpp 떨어져 있으며, 유출경계는 AP로부터 2Lpp 떨어져 있다. 그리고 y^+ 는 선행연구(김병남 등 2006, 김희택과 김형태 2009)에서 제시된 80으로 설정하였다. Fig. 2.6에 나타난 각각의 경계면에 주어진 경계 조건과 계산조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Computational conditions

	내용
CFD program	CFX, CFX-Mesh
Governing equation	Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)
Froude No	0.1423
Reynolds No	4.6×10^6
Boundary condition	Inlet region: velocity Inlet $u=1.047\text{m/s}$
	Outlet region: static pressure = 0
	Hull surface: wall (no-slip condition)
	Remaining region: symmetry
Turbulent model	$k-\epsilon$ turbulent model
Mesh type	Unstructured hybrid(tetrahedral/prism)
y^+	80

2.3 수치해석의 결과

1) 저항성능

선체에 작용하는 전체 저항을 물성 및 현상에 따라 분류하면 크게 중력에 의한 조파저항(wave resistance)과 물의 점성에 의한 점성저항(viscous resistance)으로 나눌 수 있다. 그리고 점성저항은 마찰저항(frictional resistance)과 점성압력저항(viscous pressure resistance)로 나뉜다. 본 연구에서는 자유수면을 고려하지 않은 이중모형(double hull)에 대해 유동계산을 수행하였으므로 조파저항은 계산되지 않았다.

Table 3은 수치해석을 결과로 얻어진 마찰저항계수(C_F), 점성압력저항계수(C_{VP}), 마찰저항과 점성압력저항을 더한 점성저항계수(C_V) 그리고 형상저항계수($1+k$)를 그간 발표된 양해욱 등(2010), 김희정 등(2008)의 수치해석 결과 및 김우전 등(2000)의 모형실험 결과와 비교한 것이다. 형상저항계수는 Hino(2005)가 추천한 식을 사용하였으며 계산에 사용된 평판의 마찰저항계수(C_{FO})는 ITTC-1957의 공식을 사용하였다. 수치해석의 결과는 자유수면을 고려하지 않아 모형실험의 결과와 차이가 있다.

각종 저항계수 값은 식(2.5)로 구한다.

$$C_V = \frac{R_V}{0.5\rho S_0 U^2}, \quad C_F = \frac{R_F}{0.5\rho S_0 U^2}, \quad C_{VP} = \frac{R_{VP}}{0.5\rho S_0 U^2} \quad (2.5)$$

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

여기서,

R_V = 점성저항, R_F = 마찰저항, R_{VP} = 점성압력저항

ρ = 물의 밀도

S_0 = 침수표면적

U = 배의 속도

k = 형상계수(form factor)

$$C_{FO} = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} (ITTC1957\ frictional\ coefficient) \text{ 이다.}$$

Table 3 Resistance coefficients (KVLCC2)

	$CF(\times 10^3)$	$C_{vp}(\times 10^3)$	$C_v(\times 10^3)$	$1+k$
ITTC	3.450			
김우진 등(2010)	3.211	0.677	3.888	1.127
김희정 등(2008)	3.374	0.913	4.287	1.1243
Author	3.2167	0.8563	4.073	1.183

본 수치해석에서 구한 각종 저항계수의 값은 양해옥 등(2010), 김희정 등(2008)에서 구한 값들의 사이에 있음을 확인 할 수 있다.

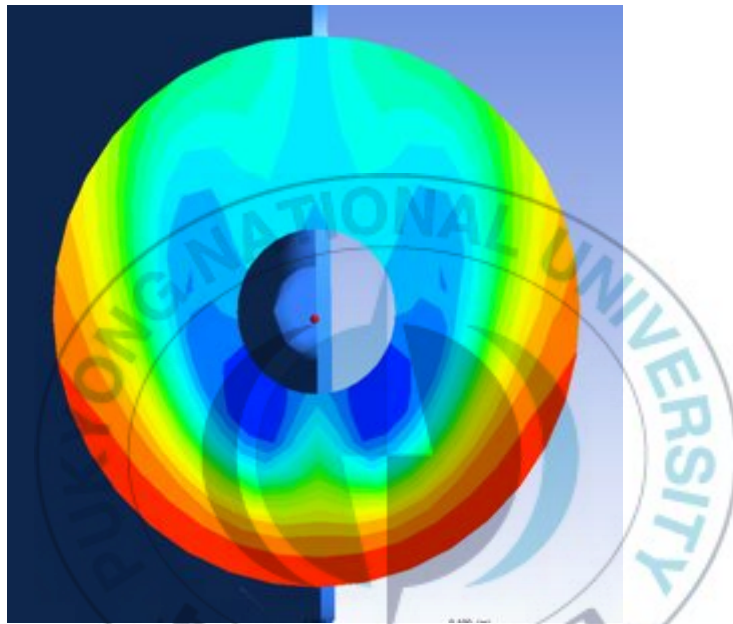


Fig. 2.7 Axial velocity distribution on the propeller plane of KVLCC2

Fig. 2.7은 프로펠러 평면에서의 공칭반류분포(nominal wake distribution)의 모습을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 값은 프로펠러 평면에서의 종방향 유속을 배의 속도로 무차원화한 값이다. KVLCC2와 같은 저속비대선의 경우, 선미부의 만곡부와류에 의해서 공칭반류분포가 갈고리 모양으로 나타나는데 Fig. 2.7에서 확인 할 수 있다.

3. Flow Control Fin의 설계

3.1 Fin의 제원

Table 4 Comparison of Chord and Span length

	Plate	Fin	
대상선박	KCS	KVLCC	
L(m)	230	320	
Chord length(m)	2	2.8	
Span length(m)	1.5	1.4	0.7(25%) ~ 2.1(75%)

Choi et al.(2009)은 KCS선형에 유동제어판을 부착하여 선체에 미치는 영향을 유체역학적 관점에서 연구하였다. 평판의 제원은 Span Length를 4개, Cord Length를 3개의 변수를 설정하여 수행하였고, 부착 위치는 길이방향으로 5st, 흡수방향으로 3st으로 설정하여 수행하였다. 조파저항계수 및 선수미 침하량 관점에서 가장 우수한 것으로 Chord length는 2.0m, Span length는 1.5m로 선정되었다.

본 연구는 FCF의 부착대상선박을 KVLCC2로 선정하였고, KCS와 KVLCC2의 길이비에 따른 chord length를 설정하였다. chord length/span length가 0.5가 되는 span length를 초기 FCF의 제원으로 설정하고 chord length/span length가 0.7(25%) ~ 2.1(75%)의 span length를 설계변수로 설정하여 연구를 수행하였다.



Fig. 3.1 Profile section shape, NACA 0012

여기서,

t (최대 두께) = $c \times 12\% = 2 \times 0.12 = 0.24\text{m}$ 이다.

FCF의 단면형상으로 NACA 0012 (Fig. 3.1)를 사용하였다. 이는 대칭성의 형상으로서 익형의 기초연구에 자주 사용된다.

3.2 FCF의 초기위치

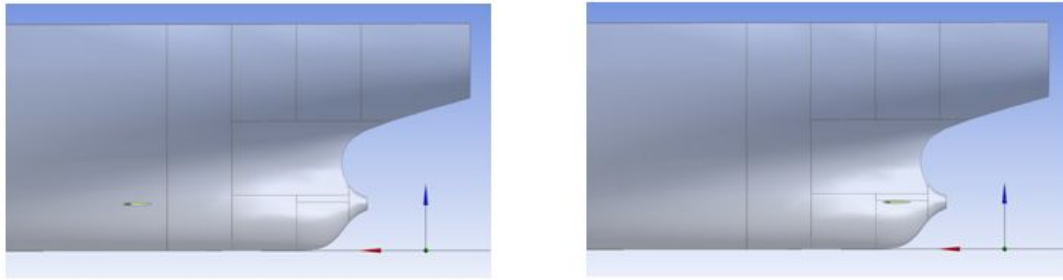


Fig. 3.1 Initial design variable of FCF (Left: 60cm, Right: 20cm)

FCF의 초기위치를 설정하기 위하여 Fig. 3.1와 같이 선체의 전진방향을 x축, 폭 방향이 y축, 연직 상방향이 z축으로 하는 직교 좌표계를 사용하였다. z축이 0이 되는 지점을 좌표축으로 잡았다. y축은 FCF의 cord length/span length가 0.5가 되는 지점을 설정하였고, z축은 프로펠러의 중심인 S.C.H(Shaft Center Height)로 설정하였다. 그리고 y축, z축은 고정하고 x축에 초기설계변수로 20cm ~ 60cm를 설정하여 반류불균등수치를 목표점함수로 하여 수행하였다. Table 5는 y축과 z축의 부착위치, FCF의 각도로서 초기설계변수의 고정되어있는 수치를 나타낸다.

Table 5 Restrictive condition of initial FCF

	Y Position	Z Position	Angle
Initial FCF	7.8cm	10cm	0°

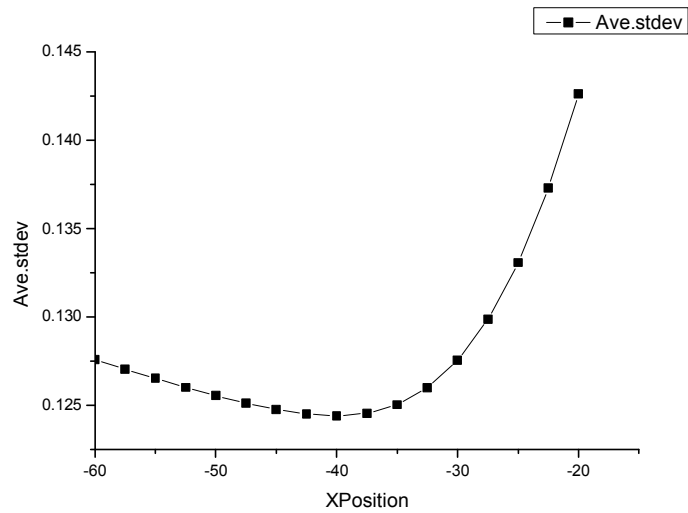


Fig. 3.2 Ave. stdev of initial design variable

Fig. 3.2는 FCF를 x축을 따라 20cm ~ 60cm의 설계변수로 하여 목적함수인 반류불균등을 수치계산 한 것이다. x축이 40.004cm에서 가장 작은 반류불균등 수치를 얻었다. 그러므로 FCF의 초기부착위치는 Table 6의 좌표로 설정하였다. Fig. 3.3은 KVLCC에 FCF의 초기부착위치를 도식화 한 것이다.

Table 6 Coordinates of Initial position FCF

	X Position	Y Position	Z Position	Angle
Initial FCF(cm)	40.004	7.8	10	0°

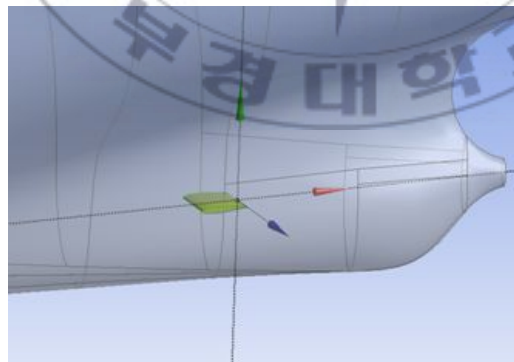


Fig. 3.3 Initial position of FCF

3.3 FCF(Flow Control Fin)와 FCFP(Flow Control Flat Plate)의 비교

X Position (-0.85 Chord length ~ 0.85 Chord length)

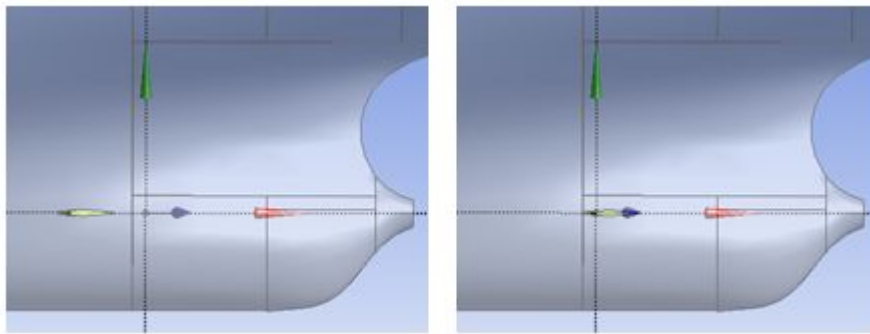


Fig. 3.4 Design variable of FCF (Flow Control Fin)
(Left: -0.85 Chord length, Right: 0.85 Chord length)

X Position (-0.85 Chord length ~ 0.85 Chord length)

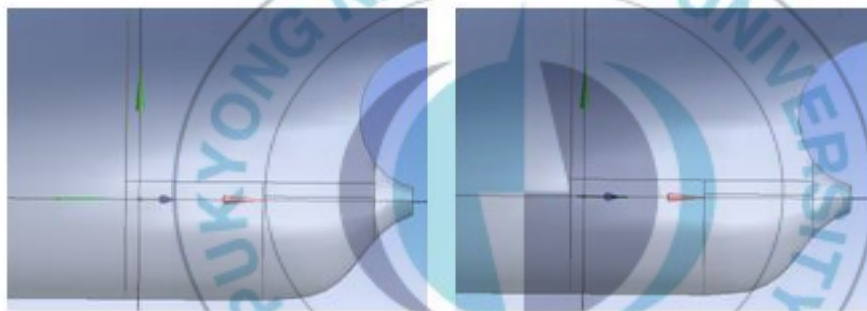


Fig. 3.5 Design variable of FCFP (Flow Control Flat Plate)
(Left: -0.85 Chord length, Right: 0.85 Chord length)

Yoon et al.(2009)에 의해서 선미유동제어장치로서 KCS에 FCFP(Flow Control Flat Plate)를 부착하여 7CASE의 부착위치를 설정하고 반류분포를 확인하였다. 본 연구는 반류불균등 분포가 KCS보다 큰 KVLCC를 대상선박으로 선택하였고, 목적함수인 점성저항 관점에서 FCFP(Flow Control Flat Plate)보다 FCF이 최소화할 수 있다고 예상된다. 이에 초기부착위치에서 FCFP(Flow Control Flat Plate)와 FCF를 부착하여 x축의 선계변수를 설정하고 점성저항의 수치를 계산하였다.

반류불균등 수치가 최소가 되는 초기위치에 FCF를 부착하여 -0.85 Chord length ~ 0.85 Chord length의 설계변수를 설정(Fig. 3.4)고 R_v 를 목적함수하여 수치계산 하였다.

반류불균등 수치가 최소가 되는 초기위치에 FCFP(Flow Control Flat Plate)을 부착하여 -0.85 Chord length ~ 0.85 Chord length의 설계변수를 설정(Fig. 3.5)고 R_v 를 목적함수하여 수치계산 하였다.

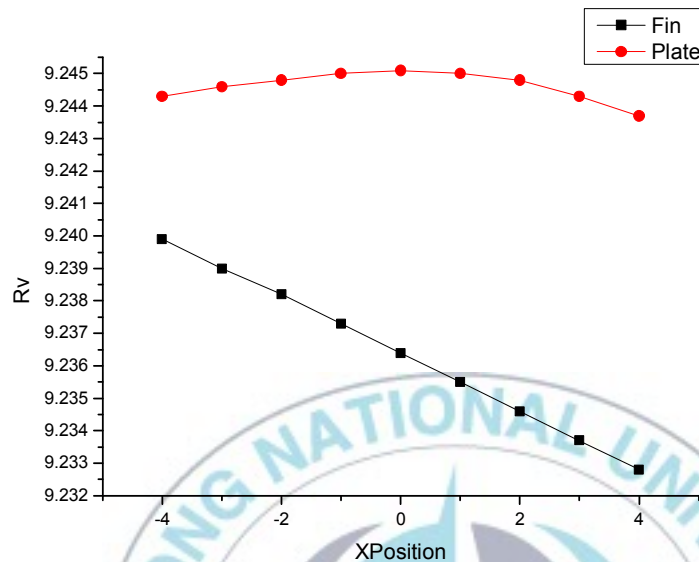


Fig. 3.6 R_v of FCF and FCFP

Fig. 3.6은 초기부착위치에서 -0.85 Chord length ~ 0.85 Chord length의 설계변수에 따른 FCFP(Flow Control Flat Plate)에 비하여 FCF를 부착하였을 때 점성저항 수치를 나타낸다. 점성저항관점에서 FCFP(Flow Control Flat Plate)보다 FCF를 부착하였을 때 점성저항이 작은 수치가 나타남을 확인하였다. 그러므로 선미유동제어장치로써 FCF를 부착하는 것이 적절하다고 판단된다.

4. 최적화

최적설계는 설계부분을 수학적 모델로 구성하고 이를 수리적인 방식으로 설계치를 구하는 자동화기법을 의미한다. 경험적 기술은 체계적인 설계변수의 변화를 얻기가 어려우므로 수리적인 방법으로 설계변수 변화를 구할 수 있는 수치적인 설계법이다.

최적화문제의 정식화과정은 설계하고자 하는 치수, 위치 등을 표시하는 변수인 설계변수, 설계변수의 함수이고 값의 비교로 어느 설계 대안이 보다 좋은가를 나타내는 판별의 기준인 목적함수, 설계변수의 함수이고 기능상 요구되는 조건인 제한조건으로 나눌 수 있다. 최적화의 3요소는 형상 변형(Modification), 수치계산(Analysis), 최적화기법(Optimization Method)이며, 최적해를 구하기 위하여 요소들이 반복적으로 수행된다. 최적설계과정은 Fig. 4.1와 같다. 본 연구에서 사용한 프로그램은 Modification은 Design Modeler, Analysis는 CFX, Optimization method는 Ansys의 GDO(Goal Driven Optimization)을 사용하여 수행하였다.



Fig. 4.1 Generalized structure of the optimization loop

4.1 설계변수

1) X Position (-0.85 Chord length ~ 0.85 Chord length)

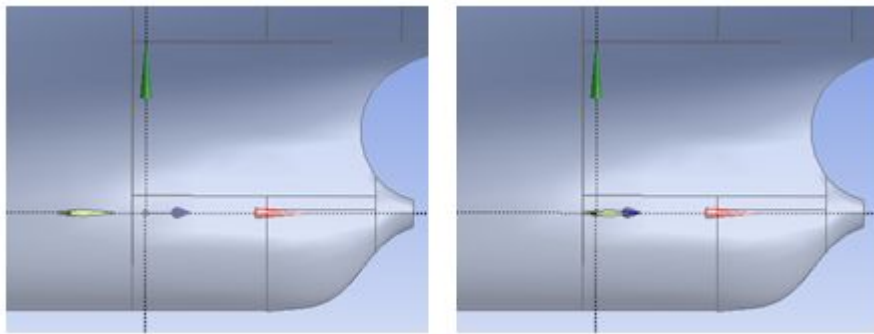


Fig. 4.2 X position design variable of FCF
(Left: -0.85 Chord length, Right: 0.85 Chord length)

2) Y Position ($-\text{Radius of Propeller}/2 \sim \text{Radius of Propeller}/2$)

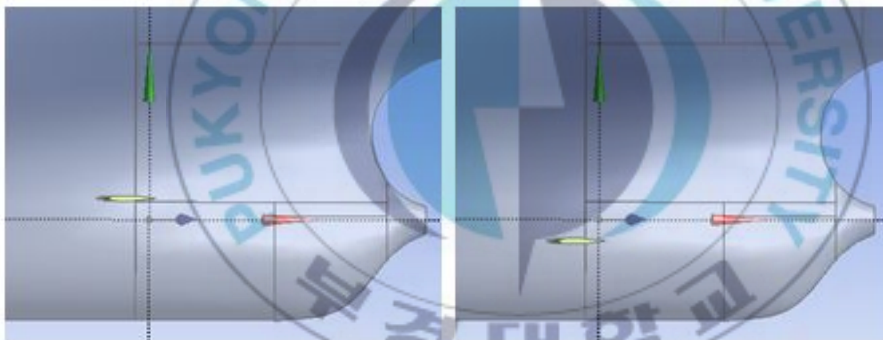


Fig. 4.3 Y position design variable of FCF
(Left: $-\text{Radius of Propeller}/2$, Right: $\text{Radius of Propeller}/2$)

3) Z Angle ($-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$)

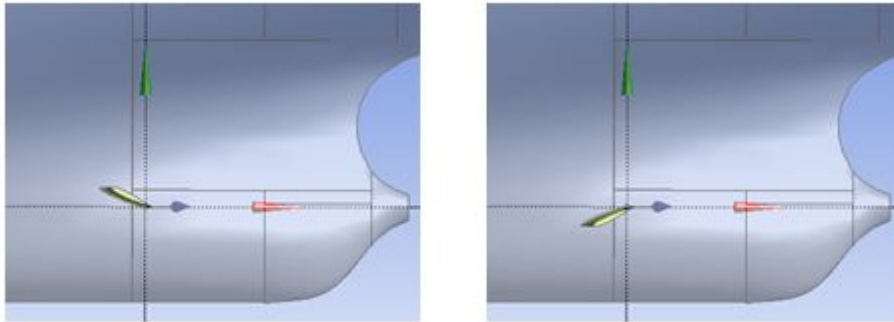


Fig. 4.4 Z angle design variable of FCF
(Left: -25° , Right: 25°)

4) Z Position (Span/Chord length = 0.25 ~ Span/Chord length = 0.75)

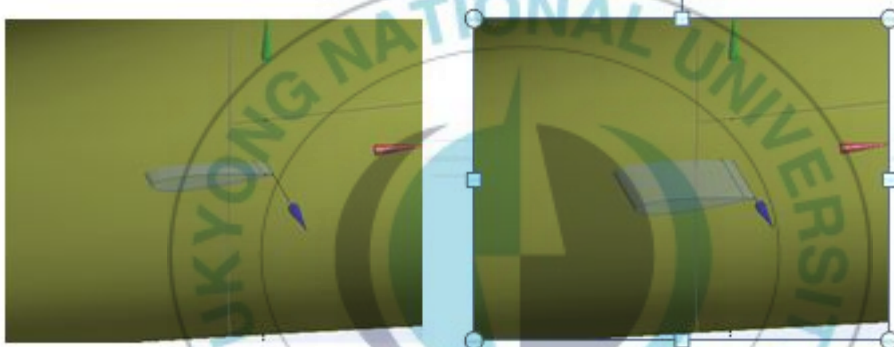


Fig. 4.5 Z position design variable of FCF
(Left: Span/Chord length = 0.25, Right: Span/Chord length = 0.75)

본 연구는 FCF의 초기위치에서 선미 길이방향을 X축, 폭 방향을 Z축, 연직 상방향을 Y축으로 좌표축을 잡았다. 그리고 FCF의 X축 위치, Y축 위치, Z축 위치, Z축의 각도를 설계변수로 사용하였다. 각 변수의 허용하한과 허용상한은 Fig. 4.2, Fig. 4.3, Fig. 4.4, Fig. 4.5와 같다.

4.2 목적함수

본 연구는 FCF의 최적설계의 목적함수로 점성저항과 반류분포의 균등정도를 사용하였다. 점성저항의 단위는 선체에 작용하는 점성저항력의 크기(N)를 사용하였다. 반류불균등 정도를 수치화시키는 방법은 Lee and Kim(2011)에서 제시한 방법을 사용하였다.

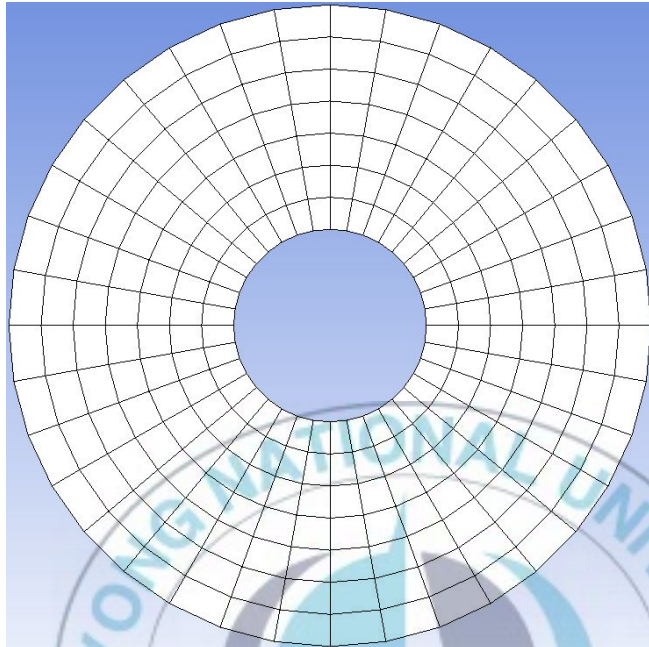


Fig. 4.6 Propeller plane of KVLCC2
Lee and Kim(2011)

선체후방에서 반류의 경우 속도의 원주방향(circumferential)성분의 불균일성은 추진효율 손실의 진정한 요인이 아니다. 그러나 종방향 성분의 불균일성은 프로펠러 반경방향의 부하분포에 영향을 주고 선체의 진동과 소음의 원인이 된다. 따라서 프로펠러 기진력의 견지에서 보면 선미반류의 분포는 프로펠러축 대하여 최대한 동심원형상에 가까운 것이 바람직하다.

반류분포를 평가하는 기준으로는 1)프로펠러평면의 12시방향 날개끝 부근에서의 국소 최대 반류비, 2)프로펠러평면 전체에 대해 평균한 평균반류 3)최대 반류가 발생하는 원주방향 폭, 3)프로펠러평면에서 공동수로 정의되는 반류변화의 폭 등이 있다(대한조선학

회 선박유체역학연구회 2009). 본 연구에서는 FCF가 프로펠러 평면 전체에서의 반류 분포에 미치는 영향을 평가하기 위해 각 반경별로 종방향 속도의 표준편차(standard deviation)를 구한 다음, 반경별 표준편차의 평균값을 반류분포 최적화의 목적함수로 사용하였다. Fig. 4.6은 프로펠러 평면을 나타내며 식(4.1)은 반류평가의 목적함수로 사용된 반류 표준편차의 평균값을 나타낸다. 식(4.1)의 정의에 의해 Ave.stdev의 값이 작을수록 반류의 분포가 균등하다고 평가할 수 있다.

프로펠러 평면을 반경방향으로 10°간격으로 나누었다. 그리고 0.3Rp ~ 1.0Rp(여기서 Rp는 프로펠러의 반경)까지 총 8개의 원주로 나누고 교점에서의 종방향 유속을 구하여 각 반경별로 종방향 유속의 표준편차를 계산하였다. 반경별 종방향 유속의 표준편차의 평균값을 반류균등도 평가의 목적함수로 사용하였다.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{37} (u - \bar{u})^2}{37}} \quad (4.1)$$

$$Ave.stdev = \frac{\sigma_{0.3} + \sigma_{0.4} + \sigma_{0.5} + \sigma_{0.6} + \sigma_{0.7} + \sigma_{0.8} + \sigma_{0.9} + \sigma_{1.0}}{8}$$

여기서,

$$u = velocity / V_A$$

$\bar{u}$ = 각 반경에서의 평균속도

x = 프로펠러 반경이다.

4.3 응답표면 생성

CFD를 이용한 최적설계의 시간을 줄이기 위하여 실험계획법(DOE)을 통해 응답표면(response surface)을 생성하고 응답표면에서 최적화 알고리즘을 적용하였다. FCF의 설계변수는 X Position, Y Position, Z Position, Z Angle 이다. 각 변수들의 실험계획법에 의한 조합 25개에 대해 점성저항(R_v)와 반류불균등도(Ave. stdev)를 계산하였다. Table 7은 설계변수 영역에서의 FCF 25개의 샘플과 계산결과를 보여준다.

Table 7 parameter sets of FCF

sample	X Position	Y Position	Z Position	Z Angle	$R_v(N)$	Ave.stdev
1	0	-0.34	-1.056	-2	9.2286	0.11884
2	1.28	0.85	0.384	-4	9.2741	0.11968
3	-3.84	0	0.768	-16	9.4487	0.12931
4	0.64	1.77	0.096	-6	9.2477	0.12601
5	-3.2	-1.36	-0.576	14	9.2127	0.12516
6	3.52	0.51	-0.672	18	9.2202	0.13665
7	0.32	1.02	0.48	16	9.2222	0.1239
8	3.2	-1.02	0.192	0	9.2745	0.12143
9	-1.6	1.19	-0.48	10	9.243	0.1205
10	-1.44	-1.19	0.242	24	9.2061	0.13319
11	-0.96	-1.7	-1.152	-22	9.3002	0.11489
12	-2.56	1.7	-0.096	2	9.2292	0.12212
13	-0.32	1.53	-0.384	-10	9.2353	0.12089
14	1.6	-0.51	0.864	-20	9.4658	0.12309
15	-1.28	2.04	-0.768	20	9.2318	0.13109
16	2.56	-0.68	0.576	-8	9.351	0.12211
17	2.24	-0.85	-0.192	22	9.1983	0.14648
18	0.96	0.17	0.96	-18	9.4428	0.12333
19	-2.88	-1.87	-0.288	-14	9.412	0.1219
20	-3.52	0.68	1.056	-12	9.3891	0.12691
21	-0.64	0.34	0.288	12	9.2055	0.12477
22	2.68	1.26	-0.86	-24	9.2533	0.12168
23	3.84	-0.17	0.672	4	9.2442	0.12745
24	-1.92	-1.53	-0.864	8	9.2206	0.11845
25	1.92	-2.04	0	6	9.2604	0.11738

응답표면(response surface)은 회귀분석(regression analysis)을 이용하여 생성된다. Table 7의 각 목적함수를 종속변수로 하고, 4개의 설계변수(X Position, Y Position, Z Position, Z Angle)를 독립변수로 하여 2차 다항함수로 표현된다.

$$R_v = f(X \text{ Position}, Y \text{ Position}, Z \text{ Position}, Z \text{ Angle}) \quad (4.2)$$

$$\text{Ave. stdev} = f(X \text{ Position}, Y \text{ Position}, Z \text{ Position}, Z \text{ Angle})$$

Fig. 4.6는 R_v 와 Ave.stdev를 WED의 Angle, Location의 함수로 표현했을 때의 모양이다.

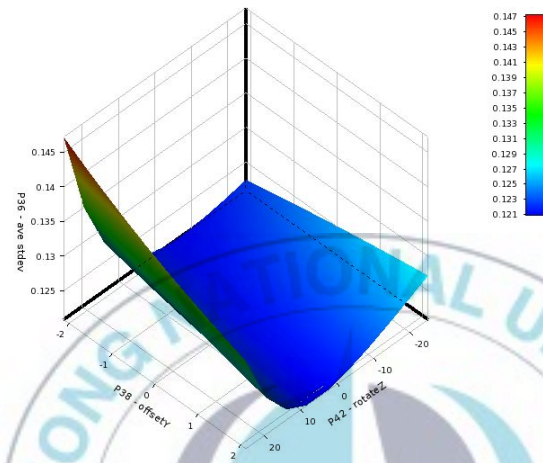


Fig. 4.7 Response surface of R_v

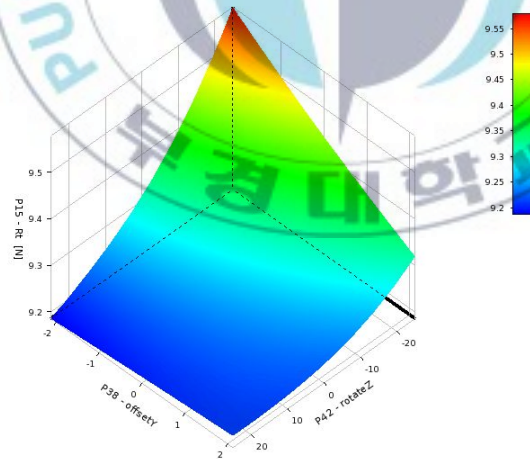


Fig. 4.8 Response surface of Ave.stdev

5. 최적화 계산 결과

최적화기법은 기울기 기반 최적화기법(Gradient Optimization Method)과 확률론적 최적화기법(Search Optimization Method)으로 분류할 수 있다.

기울기 기반 최적화기법은 목적함수와 제한조건의 미분 값을 구하는데 수치적 과정이 필요하며 수렴속도가 빨라 목적함수를 도출하는데 시간이 적게 든다는 장점이 있다. 하지만 최적해가 초기 값의 근처에 있고, 국부해가 존재하지 않아야 최적 값의 도출이 보장된다. 그리고 비선형일 경우 초기 값을 바꾸어 가며 최적화를 실행하여야 한다. SD(Steepest Descent), CG(Conjugate Gradient), SQP(Sequential Quadratic Programming)이 기울기 기반 최적화기법이다

확률론적 최적화기법은 전역 해의 가능성이 높고 다목적 함수 문제에 유용하다. 탐색시간이 많이 소요되어 제한적으로 사용되었으나 전산기의 발달로 많이 쓰여지고 있는 추세이다. GA(Genetic Algorithm), PSO(Particle Swarm Optimization), SA(Simulated Annealing)가 확률론적 최적화기법이다.

본 연구는 확률론적 최적화 기법의 단점인 시간이 많이 소요되는 점을 응답표면을 생성하여 시간을 줄였다. 그리고 전역해의 정확도를 높이기 위하여 최적화과정을 2단계로 나누어 수행하였다. 첫 번째는 확률론적 최적화 기법인 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용하여 전역해 근처의 해를 찾았다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 도출된 해를 시작점으로 하여 기울기 기반 최적화 기법인 NLPQL(Non Linear Programming by Quadratic Lagrangian, Schittkowski 1985/86)을 적용하였다.

5.1 점성저항(Rv) 최적화

최소 점성저항을 가지는 FCF의 부착위치와 제원을 찾기 위한 최적화 과정 중 첫 번째 단계로 확률론적 최적화 기법인 GA를 적용하였다. GA는 다목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II(Non-dominated Sorting GA-II, Kalyanmoy et al. 2002)를 하나의 목적함수 해결에 맞게끔 변형하여 적용하였으며 GA의 설정 값은 Table 8와 같다.

Table 8. Conditions of genetic algorithm

Number of Initial Samples	300
Number of Samples Per Iteration	100
Maximum Allowable Pareto Percentage	70
Maximum Number of Iterations	200

최적화 과정의 두 번째 단계로 기울기 기반 최적화 기법인 NLPQL을 적용하였다. Allowable Convergence Percentage는 1.0E-6이다. 그 결과 얻어진 FCF의 부착위치와 제원은 Table 9와 같다.

Table 9. Location of FCF with minimum Rv

X Position	Y Position	Z Positon	Z Angle
-3.6765	-0.42671	1.1729	21.994

Fig. 5.1은 최소 점성저항을 가지는 FCF의 부착위치와 제원에서의 한계유선(limiting streamlines)을 나타내고 있다. 선미반곡부와류(stern bilge vortex)형성으로 인한 유선의 중첩을 확인할 수 있고, 선미 벌브 근처에서 발생하는 유선수렴(streamline convergence)현상은 만곡부과류의 형성에 의한 것으로 종방향 와류를 동반한 3차원 박리(ordinary separation)현상이다. 그리고 FCF의 윗면에 비하여 아랫면에서 압력이 낮게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5.2는 최소 점성저항을 가지는 FCF의 부착위치와 제원에서의 속도벡터(Velocity Vector)를 나타내고 있다. FCF의 윗면에 비하여 아랫면에서 빠른 속도의 유속을 가지는 것을 확인할 수 있다.

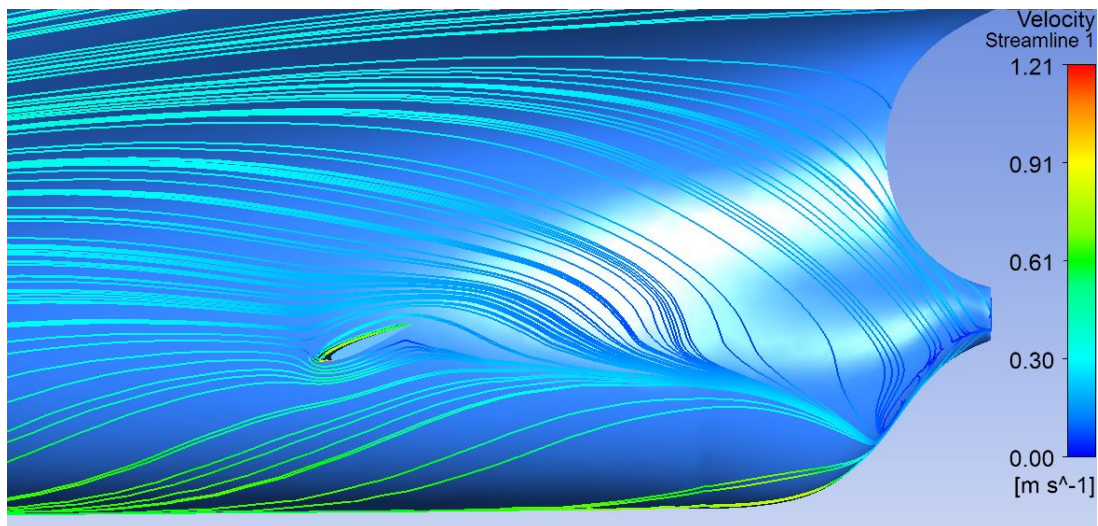


Fig. 5.1 limiting streamlines of FCF with minimum R_v

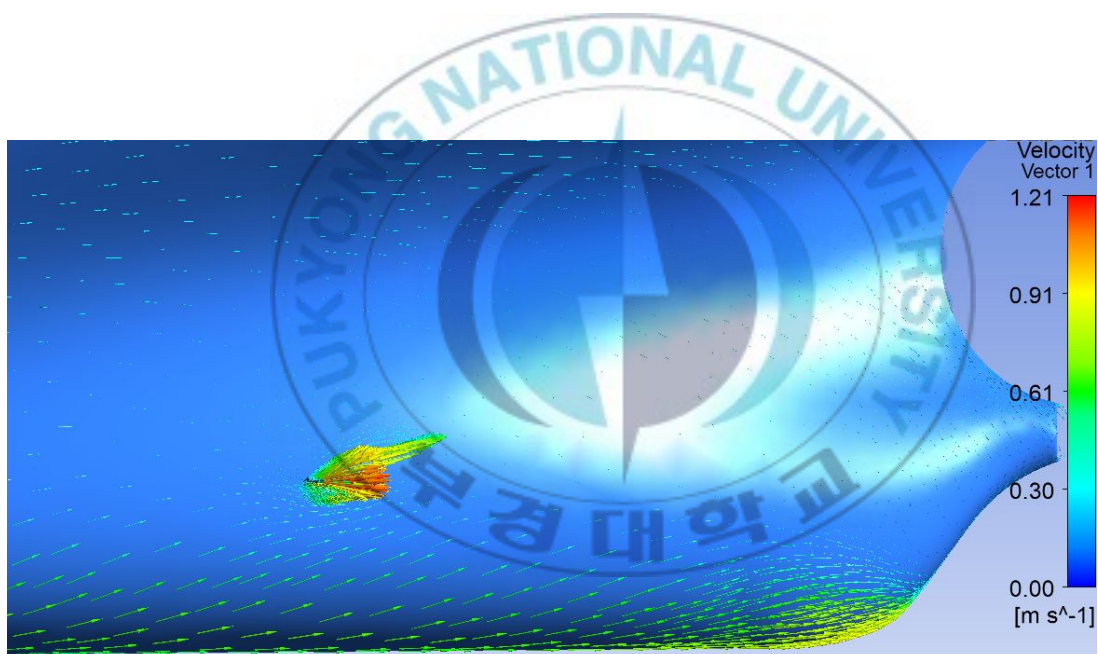


Fig. 5.2 Vector of FCF with minimum R_v

Table 10. Comparison of Hydrodynamic data
of Bare hull and hull with Rv optimized FCF

	Rv(N)	Rf(N)	Rvp(N)	Ave. stdev
Bare hull	9.1965	7.2477	1.9488	0.12763
Rv Opt hull	9.1965	7.2562	1.9403	0.13456

Table 10은 최소 점성저항을 가지는 FCF를 부착한 선박과 Bare hull의 점성저항과 반류불균등을 비교한 것이다. 점성저항은 9.1965N으로 같은 수치를 얻었고, 반류불균등도 (Ave. stdev)는 0.12763에서 0.13456으로 증가함으로써 반류불균등 정도가 증가하는 결과를 가져왔다. FCF의 부착에 의하여 마찰저항(Rf)은 0.0085N 증가하였지만 점성압력저항은 0.0085N 감소하였다. Fig. 5,2에서 보듯이 아랫면에서 압력감소에 의한 유속이 빨라지면서 만곡부와류의 형성에 의한 3차원 박리(ordinary separation)현상이 줄어든 것으로 판단된다. FCF의 부착으로 인해 마찰저항은 증가하였지만 박리감소로 인하여 점성압력저항이 줄어들어 Bare hull의 점성저항과 같은 수치를 얻었다고 판단된다.

반류분포에서 보통 프로펠러 평면의 유동의 축방향 속도는 12시 방향에서 저속구간이 존재하며 6시 방향에서 상대적인 고속구간이 존재한다. Fig. 5.2에 보듯이 6시구간의 속도를 더 증가시키고 반경이 작은 부분의 저속구간을 더욱 감소시키어 반류불균등도의 수치가 증가한 것으로 판단된다.

5.2 반류분포 최적화

최소 반류불균등수치를 가지는 FCF의 부착위치와 제원을 찾기 위한 최적화 과정 중 첫 번째 단계로 확률론적 최적화 기법인 GA를 적용하였다. GA는 다목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II(Non-dominated Sorting GA-II, Kalyanmoy et al. 2002)를 하나의 목적 함수 해결에 맞게끔 변형하여 적용하였으며 GA의 설정 값은 Table 11와 같다.

Table 11. Conditions of genetic algorithm

Number of Initial Samples	300
Number of Samples Per Iteration	100
Maximum Allowable Pareto Percentage	70
Maximum Number of Iterations	200

최적화 과정의 두 번째 단계로 기울기 기반 최적화 기법인 NLPQL을 적용하였다. Allowable Convergence Percentage는 $1.0E-6$ 이다. 그 결과 얻어진 FCF의 부착위치와 제원은 Table 12와 같다.

Table 12. Location of FCF with minimum R_v

X Position	Y Position	Z Positon	Z Angle
2.8133	2.1188	-1.132	-23.089

Fig. 5.3은 최소 반류불균등도를 가지는 FCF의 부착위치와 제원에서의 한계유선(limiting streamlines)을 나타내고 있다.

Fig. 5.4는 최소 점성저항을 가지는 FCF의 부착위치와 제원에서의 속도벡터(Velocity Vector)를 나타내고 있다. FCF의 아랫면에 비하여 윗면에서 빠른 속도의 유속을 가지는 것을 확인할 수 있다.

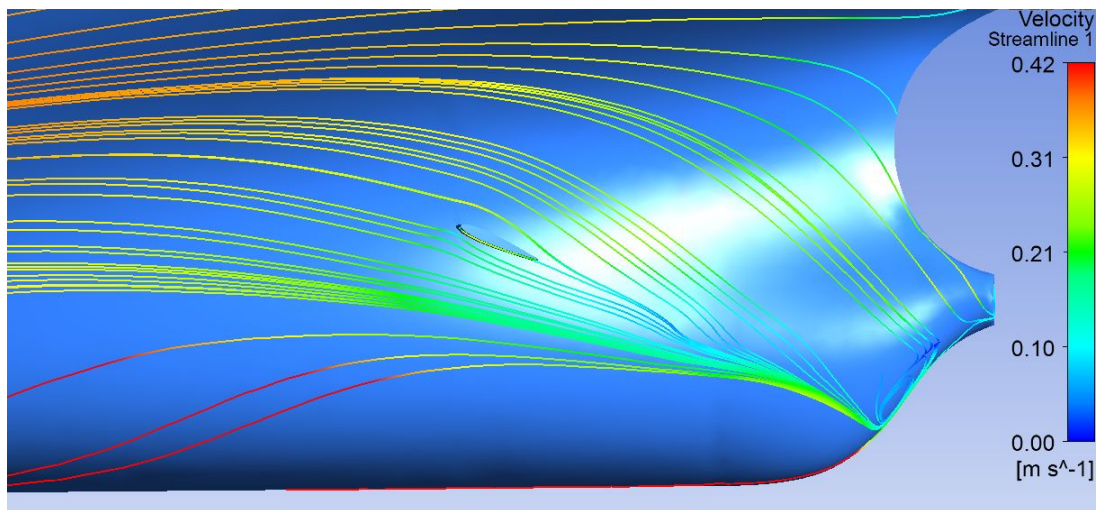


Fig. 5.3 limiting streamlines of FCF with minimum Ave. stdev

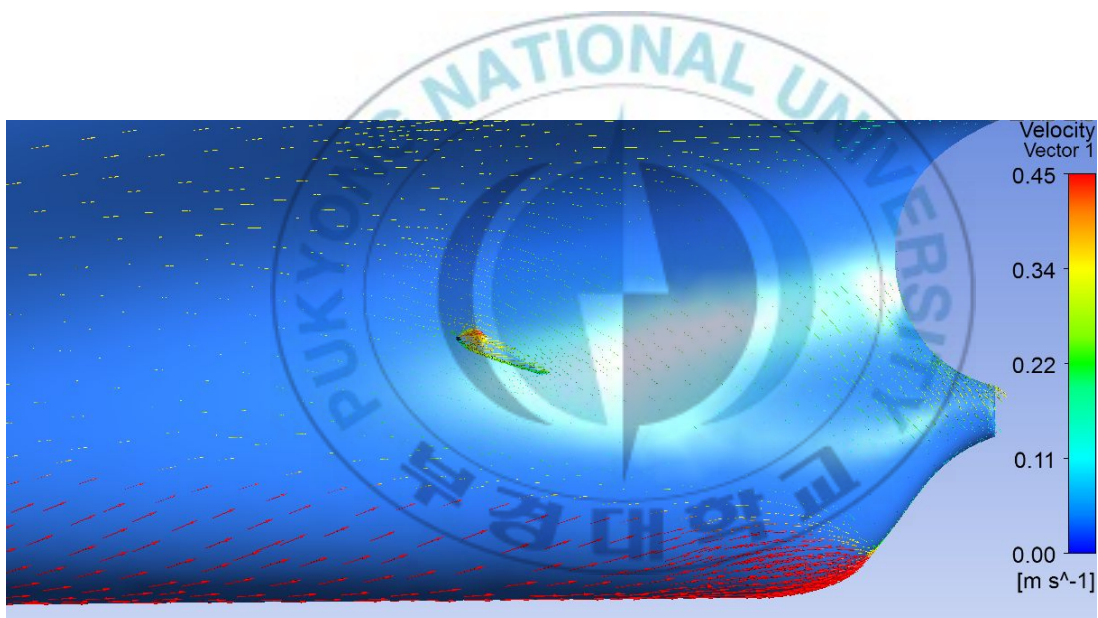


Fig. 5.4 Vector of FCF with minimum Ave. stdev

Table 13. Comparison of Hydrodynamic data
of Bare hull and hull with Ave. stdev optimized FCF

	Rv(N)	Ave. stdev
Bare hull	9.1965	0.12763
Ave. stdev opt hull	9.2465	0.11683

Table 13은 최소 반류불균등도를 가지는 FCF를 부착한 선박과 Bare hull의 점성저항과 반류불균등을 비교한 것이다. 반류불균등도는 0.12763에서 0.11683으로 0.0108 감소하였고 점성저항은 9.1965N에서 9.2465N으로 0.05N 증가하는 수치를 얻었다.

Fig. 5.5는 Bare hull과 최소 반류불균등도를 가지는 FCF를 부착한 선박의 반류 분포를 나타낸다. Fig. 5.4에서 FCF의 윗면에서 아랫면에 비하여 빠른 유속을 가지기 때문에 Bare hull에 비하여 12시 구간의 저속구간이 줄어든 것을 확인할 수 있으며 6시구간의 고속구간이 줄어든 것을 볼 수 있다. 그리고 중앙부근의 저속구간영역도 줄어든 것을 볼 수 있다.

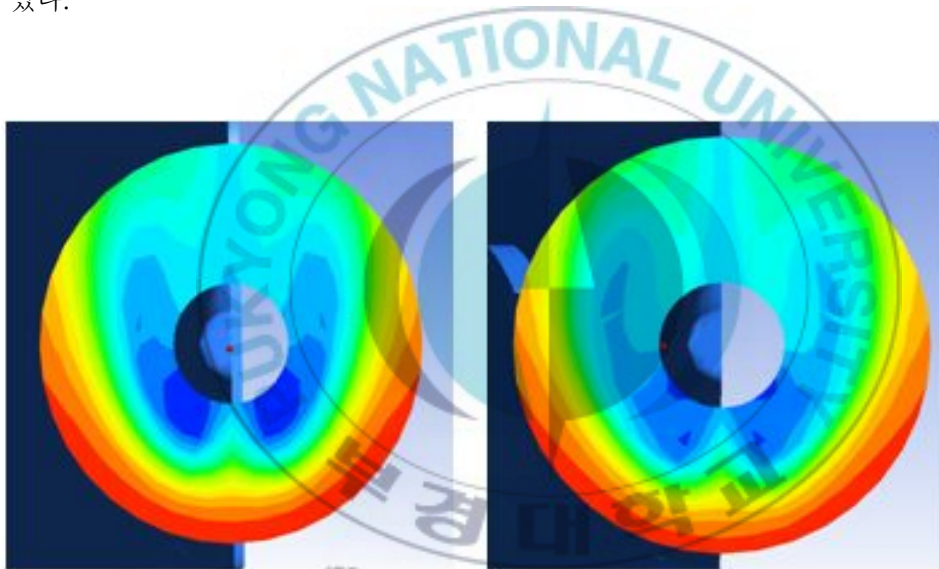


Fig. 5.5 Comparison of wake distribution at propeller plane
of Bare hull and hull with Ave. stdev optimized FCF
(Left: Bare hull, Right: Ave. stdev opt hull)

5.3 점성저항과 반류분포의 다목적 최적화

모든 목적함수를 동시에 최소화하는 최적화 과정에서 목적함수 모두를 최소화하는 해를 구한다는 것은 사실상 불가능하며, 이를 고려할 때 일반적으로 추천되는 후보해중 다른 해에 지배되지 않는 해가 선정되고 이러한 해를 비지배해(non-dominated solution)라고 불린다. 일반적으로, 앞에서 언급한 모든 목적함수를 최소화하는 최적화 과정에서 식 (5.1)을 만족하는 경우 해 x 가 해 y 를 지배한다고 하며, x 는 비지배해가 되고 $x \succ y$ 로 표기한다.

$$\begin{aligned} & x, y \in S \\ & \forall i \in 1, 2, \dots, k: f_i(x) \leq f_i(y) \quad \text{and} \\ & \exists j \in 1, 2, \dots, k: f_j(x) < f_j(y) \end{aligned} \tag{5.1}$$

식(5.1)을 통해 비지배해로 분류된 해들을 파레토 최적해(Pareto optimal solution)라고 하며, 그 집합을 파레토 최적 집합(Pareto optimal set)이라고 한다(박순규 등 2007). 다목적 최적화 문제는 하나 이상의 목적함수를 고려하므로 하나의 최적해가 아니라 최적해 집합이 도출된다. 파레토 최적해의 의미는 다른 목적함수 값을 증가시키지 않고서는 나머지 목적함수의 값을 줄일 수 없는 해를 말한다.

본 연구에서는 점성저항의 크기와 반류불균등 정도를 목적함수로 하는 FCF의 다목적 최적화를 수행하기 위해 비지배 정렬을 기반으로 하고 다목적 함수 최적화 문제에 널리 사용되는 NSGA-II(Non-dominated Sorting GA-II, Kalyanmoy et al. 2002)를 사용하였다.

Table 14. Comparison of optimum FCF and objective function

	X Position	Y Position	Z Positon	Z Angle	Rv(N)	Ave.sdtev
1	3.9992	2.125	-1.1986	-24.495	9.2277	0.1186
2	3.9992	2.0264	-1.1986	-24.495	9.2564	0.12001
3	2.8133	2.1132	-1.1622	-22.763	9.2337	0.11689

Table 14는 최소의 점성저항과 반류불균등도를 동시에 만족하는 파레토 최적해 집합으로써 FCF의 부착위치와 제원에 따른 목적함수의 값을 계산한 결과이다. 최적해집합에서 최소의 반류불균등도를 가지는 3번의 FCF의 제원과 부착위치를 선택하여 한계유선(limiting streamlines)과 반류분포를 확인하였다.

Fig. 5.6은 최소의 점성저항과 반류불균등도를 동시에 만족하는 FCF의 부착위치와 제원에서의 속도벡터(Velocity Vector)를 나타내고 있다. FCF의 아랫면에 비하여 윗면에서 빠른 속도의 유속을 가지는 것을 확인할 수 있다.

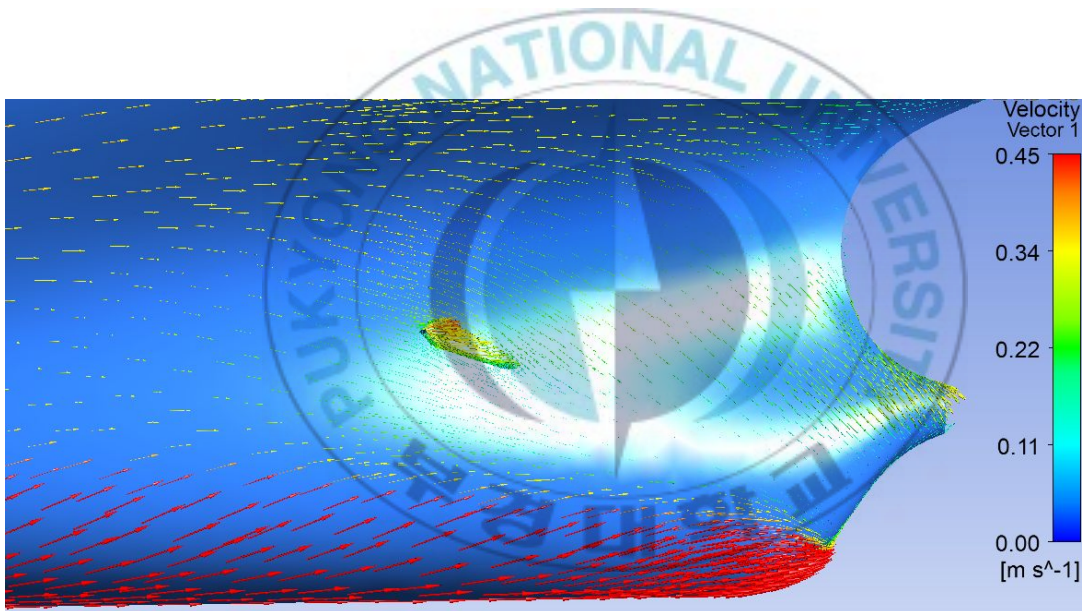


Fig. 5.6 Vector of Multiobjective optimized FCF

Table 15 Table 13. Comparison of Hydrodynamic data
of Bare hull and hull with Multiobjective optimized FCF

	Rv(N)	Ave. stdev
Bare hull	9.1965	0.12763
Multiobjective opt hull	9.2337	0.11689

Table 15의 최소의 점성저항과 반류불균등도를 동시에 만족하는 FCF를 부착한 선박과 Bare hull의 점성저항과 반류불균등도를 비교한 것이다. 반류불균등도는 0.12763에서 0.11689으로 0.01074 감소하였고 점성저항은 9.1965N에서 9.2337N으로 0.0372N 증가하는 수치를 얻었다.

Fig. 5.7는 Bare hull과 최소의 점성저항과 반류불균등도를 동시에 만족하는 FCF를 부착한 선박의 반류 분포를 나타낸다. Fig. 5.6에서 FCF의 윗면에서 아랫면에 비하여 빠른 유속을 가지기 때문에 Bare hull에 비하여 12시 구간의 저속구간이 줄어든 것을 확인할 수 있으며 6시구간의 고속구간이 줄어든 것을 볼 수 있다. 그리고 중앙부근의 저속구간영역도 줄어 든 것을 볼 수 있다.

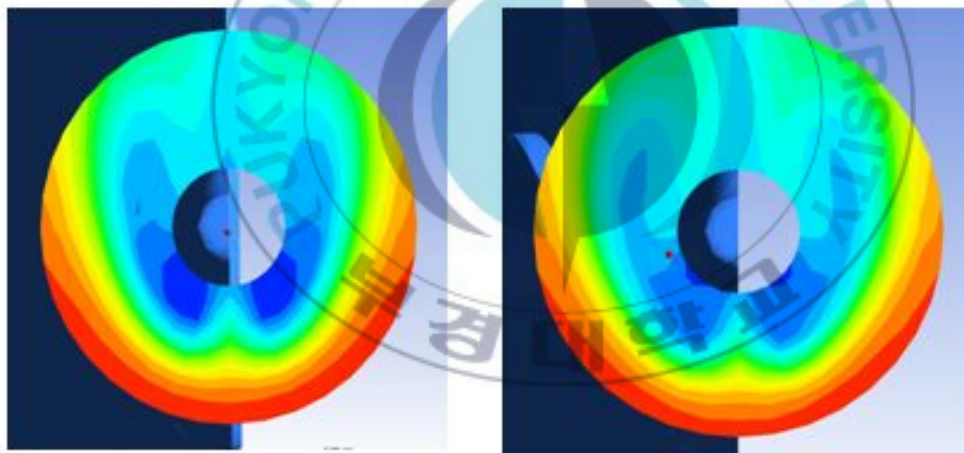


Fig. 5.7 Comparison of wake distribution at propeller plane
of Bare hull and hull with Multiobjective optimized FCF
(Left: Bare hull, Right: Multiobjective opt hull)

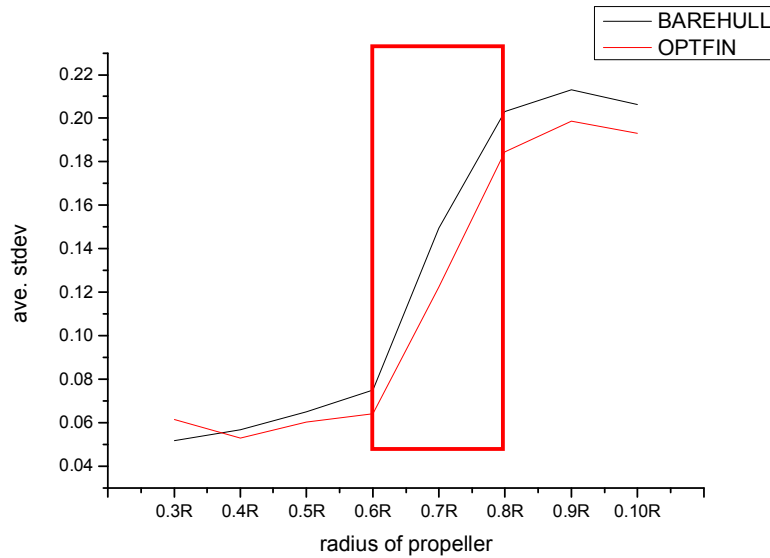


Fig. 5.8 Distribution of computational ave. stdev

Fig. 5.8은 Bare hull과 최소의 점성저항과 반류불균등도를 동시에 만족하는 FCF의 프로펠러 반경별 반류불균등도를 나타내고 있다. 0.3R에서는 Bare hull보다 반류불균등도가 높은 수치를 나타내지만 0.4R ~ 1.0R에서 낮은 수치를 나타내어 전체적인 반류불균등도가 낮은 수치를 얻은 것으로 판단된다.

Fig. 5.9는 Bare hull과 최소의 점성저항과 반류불균등도를 동시에 만족하는 FCF의 0.6R, 0.7R, 0.8R에서의 각도별 종방향 유속을 나타내고 있다. 0° ~ 45° 구간의 저속영역에서는 Bare hull보다 속도가 증가하였고, 45° ~ 180° 구간에서는 속도가 감소하였다. 저속구간의 속도는 증가하고 고속구간의 속도는 감소하여 반류불균등도의 수치가 줄어든 것으로 판단된다.

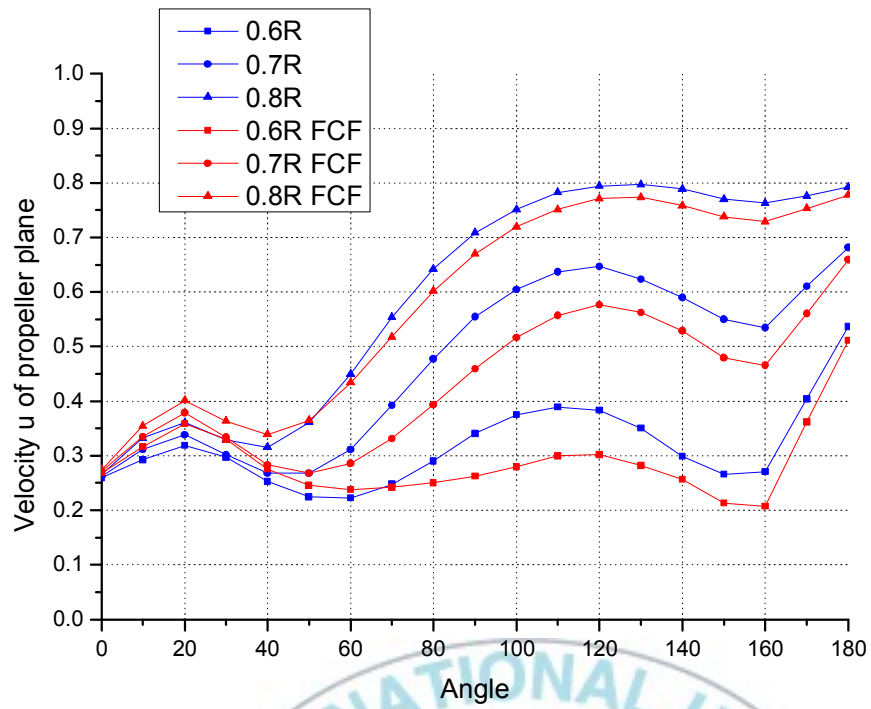


Fig. 5.9 Distribution of computational velocity u

6. 결론

본 연구에서는 선미 유동 제어 장치로서 Flow Control Fin을 부착하여 선미에서 추력을 발생시키고 반류를 균등하게 하여 선체 저항 변화와 공칭반류의 변화를 확인하고자 하였다. 그리고 점성저항과 반류 분포의 향상을 목적으로 하는 FCF의 최적설계를 수행하였다. FCF의 선형, 부착 위치, 부착 각도를 알기 위하여 설계변수를 설정하고 점성저항과 반류분포를 목적함수로 하여 FCF을 이용한 에너지 효율향상 선박을 설계하고자 하였다. 전역해의 정확도를 높이기 위하여 확률론적 최적화 기법인 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 기울기 기반 최적화 기법인 NLPQL(Non Linear Programming by Quadratic Lagrangian, Schittkowski 1985/86)을 적용하여 FCF를 점성저항과 반류분포의 관점에서 각각 최적화를 수행하였다.

1. 점성저항 최적화에서 Bare hull의 점성저항과 같은 수치를 얻었고, 반류불균등도(Ave. stdev)는 증가함으로써 반류불균등 정도가 증가하는 결과를 가져왔다. FCF의 부착에 의하여 마찰저항(Rf)은 증가하였지만 점성압력저항은 감소하였다.

2. 반류분포 최적화에서 반류불균등도는 감소하였고 점성저항은 증가하는 수치를 얻었다. Bare hull에 비하여 12시 영역과 중앙부근의 저속구간이 줄었고, 6시영역의 고속구간이 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

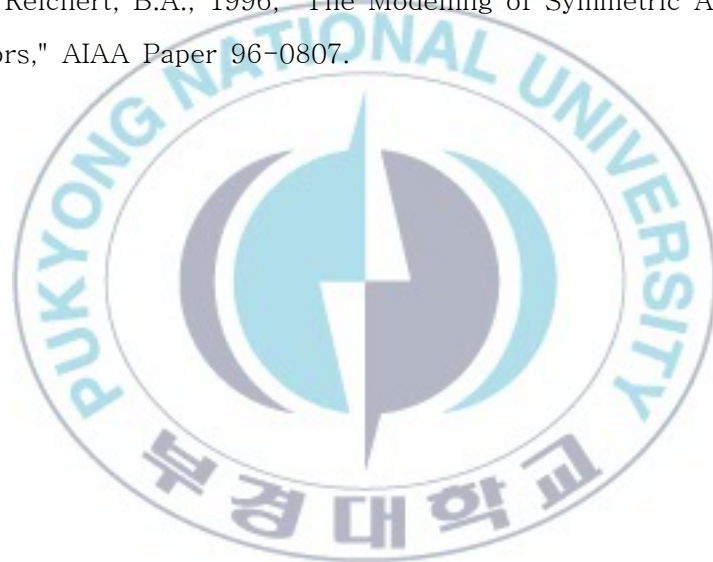
3. 점성저항과 반류분포의 다목적 최적화에서 반류불균등도는 8.4% 감소하였고 점성저항은 0.4% 증가하는 수치를 얻었다. $0^\circ \sim 45^\circ$ 구간의 저속영역에서는 Bare hull보다 속도가 증가하였고, $45^\circ \sim 180^\circ$ 구간에서는 속도가 감소하였다. 저속구간의 속도는 증가하고 고속구간의 속도는 감소하여 반류불균등도의 수치가 줄어든 것으로 판단된다.

본 연구에서는 FCF로 인하여 반류분포의 향상을 확인할 수는 있었지만, 점성저항의 증가를 가져왔다. 점성저항과 반류분포를 동시에 향상시키기 위해서 FCF의 다양한 단면형상과 설계변수영역의 확대에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘수, 2000, “선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO 300K VLCC 모형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구”, 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 3호 pp.11-20.
- 김진, 박일룡, 김광수, 반석호, 2005, “KRISO 컨테이너 및 VLCC선형에 대한 RANS 시뮬레이션”, 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 6호.
- 김희정, 전호환, 안남현, 2008, “전역 최적화기법과 파라메트릭 변환함수를 이용한 선형 최적화”, 대한조선학회 논문집, 제 45권, 제 6호, pp.590-600.
- 김희택, 반석호, 김형태, 2007, “쌍축 컨테이너선의 선미선형 변화에 따른 유동 특성에 대한 수치해석”, 대한조선학회 논문집, 제 44권, 제 6호, pp.551-563
- 대한조선학회 선박유체역학연구회, 2009, “선박의 저항과 추진”, 지성사, 서울시 마포구.
- 박동우, 최희중, 윤현식, 전호환, 2009, “유동제어평판을 가진 선박의 속도성능 향상에 관한 수치적 연구”, 대한조선학회 논문집, 제 46권, 제 3호, pp.268-278.
- 양해옥, 김병남, 유재훈, 김우전, 2010, “CFD를 이용한 모형선과 실선 스케일의 반류 비교”, 대한조선학회 논문집, 제 47권, 제 2호, pp.150-162.
- 이상준, 고민석, 이정목, 2002, “PIV를 이용한 KRISO 3600TEU 컨테이너선모형선의 반류 측정 및 해석”, 대한조선학회, 제 39권, 제 3호, pp.48-56.
- 이연승, 최영복, 2009, “Form Parameter Design을 이용한 선형최적화”, 대한조선학회 논문집, pp.562-568.

- 최희중, 전호환, 윤현식, 이인원, 박동우, 김동진, 2009, “선미부에 유동제어판을 부착한 선박에 대한 포텐셜 유동해석”, 대한조선학회 논문집, 제 46권, 제 6호, pp.587-594
- Broadley, Ian and Garry, Kevin, 1997, "Effectiveness of Vortex Generator Position and Orientation on Highly Swept Wings," AIAA-97-2319.
- H. Schneekluth and V. Bertram, 1987, "Ship Design for Efficiency and Economy", Butterworth-Heinemann Ltd, Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- Hino T., 2005, Proc. of CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japan.
- Wendt, B.J. and Reichert, B.A., 1996, "The Modelling of Symmetric Airfoil Vortex Generators," AIAA Paper 96-0807.



감사의 글

학부에서 물리교육과에 진학하여 교육학을 공부하면서 가장 기억에 남았던 말은 “줄탁동시지(茁啄同時之)”라는 고사성어입니다. 암탉이 알을 품은 지 2주 후에 어미 닭은 밖에서 안으로, 병아리는 안에서 밖으로 재잘거리며 껍질을 쪼면 3일 후에 껍질은 깨지고 새로운 생명이 태어난다는 의미로 교육은 어미닭과 병아리가 안과 밖에서 서로 협력하듯이 교사와 학생이 서로 상호작용을 통하여 이루어진다는 것을 의미합니다. 교사의 길을 가려던 저의 신념이기도 했었습니다. 하지만 임용고시의 두 번의 실패로 저의 길이 아니라고 판단하고 부경대학교 조선해양시스템공학 대학원에 진학하였습니다.

학부를 타 전공에서 이수하였기 때문에 전공수업에서 많은 어려움이 있었지만 여러 교수님들의 도움으로 논문을 무사히 마칠 수 있었다고 생각합니다. 특히, 학업뿐만 아니라 취업, 학교생활까지 신경 써 주신 김동준 교수님께 감사드립니다.

“줄탁동시지(茁啄同時之)”의 뜻을 직접 경험할 수 있게 해주신 여러 교수님께 깊은 감사에 뜻을 전합니다.



2011 년 8 월
위다얼