



소형 쌍동선의 저항성능 개선을 위한 선형 최적화 기법 개발

박정윤¹·이종현¹·서장훈¹·박동우^{2,†}
동명대학교 조선해양시뮬레이션센터¹
동명대학교 해양모빌리티학과²

Development of Hull Form Optimization Method for Improving Resistance Performance of Small Catamaran

Jung Yoon Park¹·Jonghyeon Lee¹·Janghoon Seo¹·Dong-Woo Park^{2,†}
Shipbuilding & Marine Simulation Center, Tongmyong University¹
Department of Marine Mobility, Tongmyong University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The present study established hull form optimization for small catamaran based on variations of knuckle lines. Four knuckle lines below the free surface were employed as design variables. Knuckle lines were independently transformed within remaining the main dimensions of the existing hull. For the hull form optimization, the SHERPA algorithm of HEEDS was utilized. Computational fluid dynamics was employed to estimate the resistance performance. The optimal hull showed the improvement of resistance performance of 9.3% than that of existing hull. The improvement of wave and pressure distributions for optimal hull was confirmed. Throughout the present study, it is expected that established optimization method can be applied for various small vessels such as fishing and leisure boats.

Keywords : Hull form optimization(선형 최적화), Small catamaran(소형 쌍동선), Knuckle line(너클라인), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Resistance performance(저항성능)

1. 서론

국제해사기구(IMO)는 2008년 대비 2050년까지 총 연간 GHG(Greenhouse Gas) 배출량을 50 %까지 줄이는 것을 목표로 하고 있다. 선박 건조 시부터 효율 기준을 만족해야 하는 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 제도는 2013년부터 시행 되어왔으며, 해양오염방지협약(MARPOL)이 개정됨에 따라 2023년부터는 현재 운항 중인 국제항해선박의 에너지 효율 개선을 위한 EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index), CII(Carbon Intensity Indicator) 제도가 도입 및 시행된다. 이와 같은 온실가스 감축을 위한 규제가 강화되면서 탄소 배출을 줄이고자 하는 선주들의 노력이 커지고 있다(Lindstad et al., 2022).

선박에서 배출되는 탄소를 줄이는 방법으로는 탈황장치 및 보조추진장치 설치, 친환경 연료를 사용하는 방법 등이 대표적이다

(Aakko-Saksa et al., 2023). 친환경 연료에는 액화천연가스(LNG), 메탄올, 수소 등이 있으며 최근에는 본 연구 대상 선박의 추진을 위해 활용되는 암모니아도 이산화탄소 배출이 없는 무탄소 연료로 주목받고 있다. 하지만 장치 설치나 친환경 연료의 사용만으로는 규제 강화 속도를 따라가는 것에 한계가 있다. 따라서 선박의 연료 사용량을 줄여 온실가스 배출을 감소할 수 있도록 선형 최적화를 통한 고효율의 선박 설계가 필요하다.

선형 최적화는 오래전부터 설계자가 지식과 경험에 의해 선형을 직접 수정하는 방식으로 수행됐으며, 모형시험을 통해 선형의 유체동역학적 성능을 평가함으로써 최적선형을 도출하는 일련의 과정이 반복되었다(Park et al., 2015; Huang et al., 2016; Lee et al., 2017). 이후 컴퓨터의 성능 및 최적화 기법이 점차적으로 발달함에 따라 이들을 이용한 선형 최적화가 수행되고 있으며, CAD 프로그램을 이용하여 선박의 형상을 수정하고 전산유체역

학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석을 통해 성능 평가를 반복적으로 수행하여 최적선형을 도출한다. Park et al. (2012)은 선형변환 자동화를 위해 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)기법을 적용하였다. 포텐셜 유동해석을 통해 고속 증형 Ro-Pax 선형의 최적선형 설계를 수행하였으며, 목적 함수인 조파저항성능을 약 9 % 정도 개선하였다. Kim et al. (2015)는 대형 컨테이너 운반선의 단축 및 쌍축선의 선형 최적화를 CFD와 모형시험을 이용하여 수행하였으며 기본설계와 에너지 효율 관점에서 선형 최적화를 체계적으로 수행한 바 있다. Yu et al. (2017)은 선수부 선형변환을 위해 파라메트릭 변환곡선을 이용한 SAC(Section Area Curve)와 횡단면 형상을 체계적으로 변환할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 대상선은 벌크 화물선으로 정수중에서 조파저항과 파랑중에서 부가저항을 최소화하는 다목적 함수를 설정하였으며 선수 선형 최적화를 통해 약 13 %를 개선하였다. Park et al. (2022)은 파라메트릭 변환곡선을 이용하여 선수부 선형을 변환시켰으며 더 나아가 선박설계에 있어 기본요소인 SAC와 횡단면 형상에 대하여 배수량을 일치시켰다. 이를 통해 자동으로 배수량 제약조건을 만족하고 높은 정도를 보장하는 체계적인 선형 변환 기법을 제안하였다.

소형 쌍동 선박의 선형 변환 연구를 살펴보면 두 선체 사이의 간격 변화에 따른 저항성능 차이를 확인하거나, 단동선형의 단순한 선형 변환을 통한 저항성능 차이를 비교한 바 있다. Park et al. (2001)은 저속 및 중속 조건에서 쌍동선의 두 선체 간격이 유동특성에 미치는 영향을 연구하였으며 선체 사이의 거리가 가깝고 속도가 증가할수록 유동의 상호 간섭이 증가하는 것을 실험을 통해 나타내었다. Kim et al. (2010)은 두 동체 사이에 발생하는 파도로 인한 간섭을 줄이고자 단동선형의 형상을 비대칭으로 설계한 2인승 쌍동형 레저 선박의 선폭 최적화를 수행하였다. 수치 해석을 통해 두 선체 사이의 간격이 넓을수록 파도에 의한 상호 간섭이 줄어들고 모형시험을 통해 높은 속도에서 선체 사이에서 간섭이 크게 나타나는 것을 확인한 바 있다. Choi et al. (2013)은 쌍동선을 이루는 단동선형의 형상에 대하여 연구하였으며 비대칭과 대칭인 단동선형을 가진 서로 다른 두 가지 쌍동선에 대해 수치해석을 수행하였다. 다양한 선속에서 해석을 수행하였으며 계산된 전속도 영역에서 비대칭 선형의 조파저항성능이 우수함을 확인하였다. Park et al. (2022)는 소형 쌍동 선박에 대하여 주요치수를 기반으로 한 선형 최적화를 수행한 바 있으나, 선체 길이, 폭, 흘수 등의 주요치수만으로 선형 최적화를 수행하여 국부적인 선형 변환의 특징을 반영하지 않았다.

이러한 선형연구에서 수행한 소형 선박의 선형 변환에 따른 저항성능 평가는 단순한 형상 변경만을 기반으로 하고 있다. 또한 소형 선박의 주요 선형 특성인 너클라인(knuckle line)은 선형 연구에서 주로 다루어온 대형 선박의 선형에서 정의되지 않기 때문에 이를 바탕으로 한 소형 선박의 선형 최적화가 수행된 바 없다.

이에 본 연구에서는 소형 쌍동선을 대상으로 하여 설계 변수를 제어함으로써 너클라인의 형상을 변형시킬 수 있는 선형 변환 기법을 개발하고, 변수 기반의 선형 최적화 과정을 자동화하여

Table 1 Main particulars of target ship

Particulars		Ship
Froude number	F_n	0.303
Scale ratio	λ	9.400
Design speed	V	8.0 knots
Length between perpendiculars	L_{PP}	18.800 m
Breadth of demi-hull	B	1.960 m
Draft	T	0.970 m
Distance between demi-hull centerplane	d	7.000 m
Displacement volume	DISV	47.926 m ³
Wetted surface area	WSA	115.637 m ²

대상 선박의 저항성능을 향상시키고자 한다. 우선 소형 선박의 선형 변환 기법을 정립한 후 자동 최적화 설계 변수를 선정하고 저항 성능을 평가한다. 이를 자동화된 최적화 기법에 적용하여 최적의 저항성능을 가진 소형 선박의 선형을 도출하고, 최적선형과 기존선형의 저항성능 비교를 통해 소형 선박의 최적화 방법을 정립하고자 한다.

2. 선형 변환 및 최적화

2.1 대상 선박

본 연구의 대상 선박은 암모니아 개질기에서 생성된 에너지로부터 일부 추진동력을 얻는 암모니아 기반 연료전지 하이브리드 선박이다. 대상 선박은 갑판에 암모니아 개질기 시스템을 탑재하기 용이하도록 쌍동선으로 설계되었으며 저항성능의 개선을 위해 단동선을 기준으로 안쪽과 바깥쪽의 선형이 비대칭으로 설계되어 있다. 대상 선박의 주요 제원을 Table 1에 나타냈다. 대상 선박의 저항성능 평가 및 최적화는 모형선 축적을 바탕으로 수행되었다.

2.2 선형 변환 코드 개발

본 연구에서는 대상 선박의 저항성능을 개선시키기 위해 선체의 너클라인 형상 변환을 통한 선형 최적화를 수행하고자, 선체 안팎 각 3개의 너클라인에 대해 Fig. 1과 같이 명명하였다. 이중 흘수선 상부에 위치하여 자유수면과 거리가 멀어 저항성능 개선에 있어 상대적으로 기여도가 낮은 2개의 라인(in_top, out_top)은 변환 대상에서 제외하였으며, 흘수선 하부의 4개 라인에 대한 형상 최적화를 수행하였다.

선형 최적화 과정의 자동화를 위해 너클라인의 형상이 설계 변수의 변화에 따라 변환되는 선형 변환 코드를 개발하였고, 이 코드는 상용 모델링 소프트웨어인 Rhinoceros Ver. 6 내의 grasshopper 모듈을 사용해 작성하였다. Grasshopper는 시각적

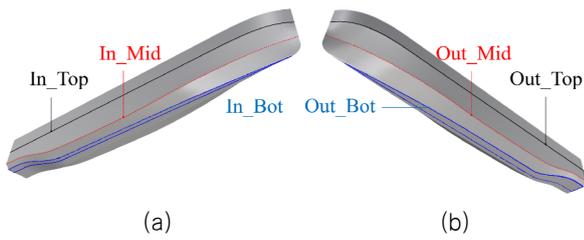


Fig. 1 Definition of design variables for knuckle lines of the (a) inner and (b) outer hull

프로그래밍 언어(visual programming language)로 컴퓨터 비전 공자가 비교적 활용하기 쉽다는 장점이 있으며 NURBS 기반 3D 모델링 소프트웨어인 Rhinoceros 3D에서 구동되는 plug-in의 일종이다 (Kim, 2016). Grasshopper는 일반적으로 건축 설계 분야에서 주로 사용되며 grasshopper의 모델링을 통해 선형 및 비선형까지 다양한 개념적 설계를 다루는데 용이하다 (Shi et al., 2013). 이러한 이유로 grasshopper를 모델링 프로그램으로 하는 연구가 많이 이루어지고 있으며, 최근에는 선수 벌브(bulb)의 모델링을 위해 Grasshopper를 활용하여 매개변수화된 벌브를 생성하고 재구성하는 연구도 이루어진 바 있다 (Zhang et al., 2018). 따라서 형상 변환을 위해 NURBS surface 기반의 3차원 형상 변형 기법을 적용하였으며, 이는 surface를 구성하는 제어점(control point)을 이동시킴으로써 형상이 변형되는 방식으로 곡면이 많은 선체를 매끄럽게 구성할 수 있고, NURBS surface로 생성된 선체 표면의 제어점을 재배치하여 간편하게 형상 변환이 가능하다는 장점이 있다. 선체가 알루미늄 강판으로 건조되어 주로 직선에 가까운 선형을 갖는 대상 선박의 특성상 너클라인의 형상이 바뀔 시 해당 라인을 경계선으로 갖는 surface가 변형되므로, 너클라인의 형상 변환에 관여하는 설계 변수를 정의하여 변수를 변화시킴으로써 선형이 변형되도록 코드를 구성하였다.

변환 대상인 선저 근처의 2개 너클라인(In_Bot, Out_Bot)과 자유수면 근처의 2개 라인(In_Mid, Out_Mid)을 변형시키기 위해 라인 In_Mid, Out_Mid가 선수 수선(FP)과 맞닿는 지점의 높이 및 트랜섬(transom)의 형상을 변화시키는 1개의 설계 변수(Mid_H)와 각 라인의 형상을 단독으로 변형시키면서 변수명이 라인 명칭과 동일한 설계 변수 4개(In_Bot, Out_Bot, In_Mid, Out_Mid)를 정의하였다. 이때 각 라인의 변환 기법 및 설계 변수는 기존선형의 특성을 고려해 정의하였으며, 변수 Mid_H를 제외한 나머지는 각 라인을 독립적으로 변형시킨다.

선저 근처 라인의 대부분은 선저면의 경계를 구성하고 있고, 선수 방향 끝은 선수재(stem) 상에, 선미 방향 끝은 트랜섬 최하단에 위치한다. 이러한 특성상 라인을 구성하는 제어점을 선박의 깊이 방향으로 이동시킬 시 선박의 깊이와 트랜섬의 높이가 달라지게 되므로, 라인 In_Bot과 Out_Bot의 제어점 위치는 선박 폭방향으로의 이동만 고려하였다. 두 라인의 형상 변환을 설명하기 위해 대상 선박의 정면도상 좌현 선수부 외곽선을 Fig. 2에 도시하였으며, 선체 중앙부 상의 제어점이 제어되는 방식을 예로 들어 설명한다. 제어점의 이동은 Out_Bot과 Out_Mid의

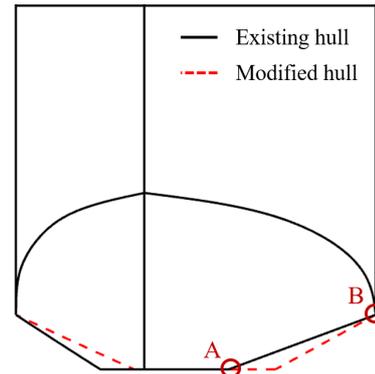


Fig. 2 Variation example of knuckle lines near the bottom of ship (bow outlines on port side in front view)

제어점 중 동일 station에 위치한 두 점 A, B로부터 가상의 직선 AB를 그렸을 때 out_mid의 제어점 B는 고정시킨 채 직선의 기울기를 변화시키는 방법으로 구현하였고, 기울기의 변화율에 따라 선저 근처 라인의 제어점 A가 선박의 폭 방향으로 이동해야 할 거리가 결정된다. 이때 선저 근처 라인이 선수재와 맞닿는 위치가 유지된 채 형상이 변형되도록 선수 방향 끝 제어점의 이동량이 0, 선미 방향 끝에서의 기울기 변화율이 최대가 되게끔 변환 함수를 정의하였다. 또한 제어점의 위치가 선수에서 선미 쪽으로 갈수록 기울기 변화율이 완만하게 증가하게끔 정의해 선형의 순정(fairness)에 큰 변화가 없도록 하였고, 선미 방향 끝 제어점의 최대 이동량은 제어점이 선박의 폭을 넘어서지 않도록 제한하였다. 여기서 설계 변수 In_Bot과 Out_Bot은 선미 방향 끝에서의 최대 기울기 변화율을 의미하며, Fig. 2에 도시된 변형된 In_Bot은 기울기의 절대값이 감소하여 제어점이 선체의 중심면(center plane) 방향으로, Out_Bot은 기울기의 절대값이 증가하여 제어점이 선측 바깥 방향으로 이동해 형상이 변형되었다.

반면 자유수면 근처 라인의 특징은 라인의 일부가 선체 측면의 편평한 면(side parallel body)을 구성하고 있고, 안팎의 두 라인이 선수 수선 상에서 맞닿는다는 점이다. 이에 따라 선박의 폭을 유지하기 위해 제어점의 이동은 선박의 깊이 방향으로만 고려하였고, 1개의 라인당 설계 변수 Mid_H를 포함한 2개의 변수에 의해 형상이 변형되도록 코드를 구성하였다. In_Mid와 Out_Mid의 형상 변환을 설명하기 위해 대상 선박의 측면도상 외곽선을 Fig. 3(a)에, 정면도상 좌현 선수부 외곽선을 Fig. 3(b), (c)에 도시하였으며, 선체 중앙부 상의 제어점인 Mid_H가 제어되는 방식을 예로 들어 설명한다. 먼저 Fig. 3(a)에 도시된 선수부 외곽선 중 선수재의 곡선 AB는 유지시킨 채 두 라인이 선수 수선 상에서 맞닿는 지점 C의 높이와 트랜섬의 형상 변환이 수행되었다. 제어점의 이동은 마찬가지로 Fig. 3(b)에 도시된 자유수면 근처 라인의 제어점 D와 동일 station에 위치하면서 선수재의 곡선을 변화시키지 않는 제어점 중 거리가 가장 먼 점 E로부터 가상의 직선 DE를 그리고, 이 직선의 기울기를 변화시킬 때 자유수면 근처 라인의 제어점 D만 이동하는 방법으로 구현하였다. 이때 각 station에서의 기울기 변화율은 직선을 구성하는 두 점의 높이차

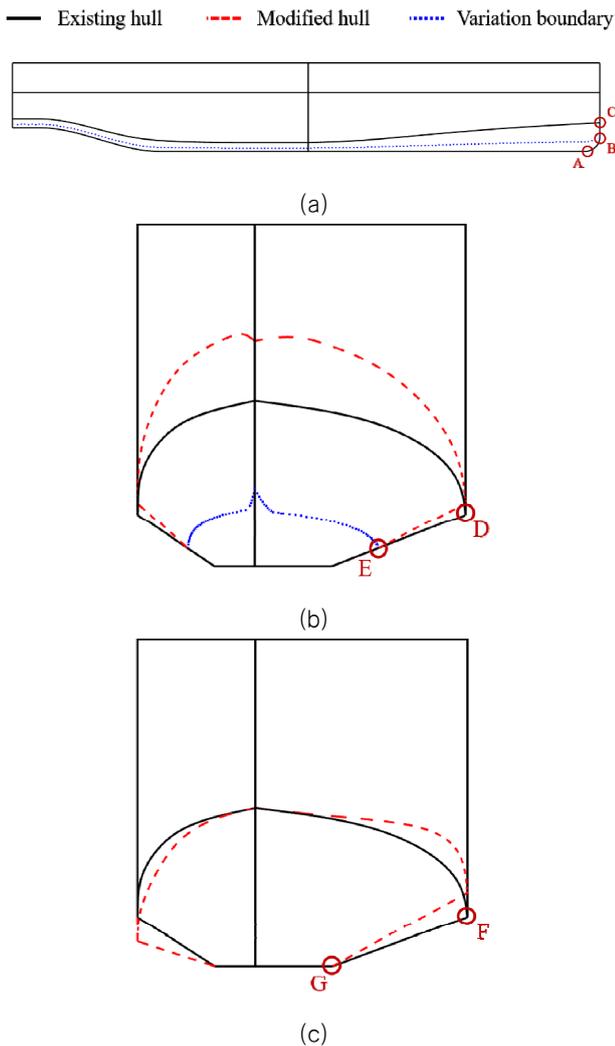


Fig. 3 Variation example of knuckle lines near free surface, (a) variation boundary in the side view (b) bow outlines on port side in the front view (1st variation) and (c) bow outlines on port side in the front view (2nd variation)

에 의해 결정되며, 높이차가 가장 큰 점에서의 변화율이 최대, 높이차가 가장 작은 점에서의 변화율은 최대 변화율의 0.5배가 되도록 변환 함수를 정의하였다. 여기서 설계 변수 Mid_H는 높이차가 가장 큰 점에서의 최대 기울기 변화율이고, Fig. 3(b)에 도시된 변형 선형은 기울기의 절대값이 증가하여 제어점이 중력 반대 방향으로 이동해 형상이 변형되었다.

변수 Mid_H에 의해 변환된 라인은 Fig. 3(c)에 도시된 자유수면 근처 라인과 선저 근처 라인의 제어점 중 동일 station에 위치한 두 점 F, G로부터 다시 가상의 직선 FG를 그린 뒤, 선저 근처 라인의 제어점 G는 고정시킨 채 직선의 기울기를 변화시키는 방법으로 1회의 변환이 추가로 수행된다. 이때 앞 단계에서 변환된 두 라인이 선수 수선 상에서 맞닿는 지점의 높이와 트랜섬의 형상을 유지하기 위해 선수와 선미 방향 끝 제어점의 이동량이 0, 선체 중앙부에서의 기울기 변화율이 최대가 되도록 변환 함수를

정의하였다. 여기서 설계 변수 In_Mid와 Out_Mid는 선체 중앙부에서의 최대 기울기 변화율이며, Fig. 3(c)에 도시된 변형 선형의 안쪽 라인은 기울기의 절대값이 감소하여 제어점이 중력 방향으로, 바깥쪽 라인은 기울기의 절대값이 증가하여 제어점이 중력 반대 방향으로 이동해 형상이 변형되었다.

앞서 기존선형의 특성을 고려하여 설정된 설계 변수 범위의 타당성을 검토하고자 설계 변수를 임의로 변환시키며 선형 변환 정도를 확인하였다. Fig. 4는 본 연구에서 고려한 대상 선형과 설계변수의 최대 변환 범위에서의 변환 선형을 나타낸다. 기존선형의 너클라인은 흑색 실선, 설계 변수를 최대값으로 변환시켰을 때 선형의 라인은 적색 파선, 설계 변수를 최소값으로 변환시켰을 때 선형의 라인은 청색 점선으로 도시하였다. Fig. 4(a), (b)는 선체 안쪽과 바깥쪽의 자유수면 근처 라인이 최대 및 최소의 범위로 변환된 선형으로 기존선형의 주요 제원을 벗어나지 않도록 상하 방향으로만 이동하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)는 선저 근처 라인이 변환된 선형으로 기존선형의 깊이를 유지하기 위해 폭방향으로만 이동하며 선수 부근은 선저면의 경계를 구성하기 때문에 변화가 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 너클라인의 형상 변환에 사용된 순서를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 우선 변환하고자 하는 너클라인을 포함한 면을 지정한 후, 제어점의 이동을 통한 In_Bot와 Out_Bot의 변환을 독립적으로 수행한다. 다음으로 Mid_H 변수에 종속되는 In_Mid와 Out_Mid의 1차 변환을 수행한 이후, In_Mid와 Out_Mid의 2차 변환이 독립적으로 이루어진다. 해당 순서를 바탕으로 gashopper 코드를 구성하였으며, 이를 Fig. 5(b)에 나타내었다.

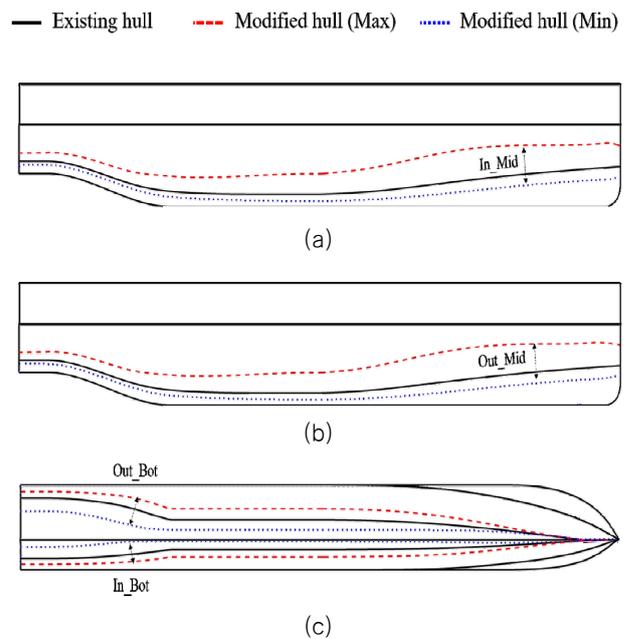


Fig. 4 Upper and lower bounds of the transformation of knuckle lines: (a) inner side view, (b) outer side view and (c) bottom view

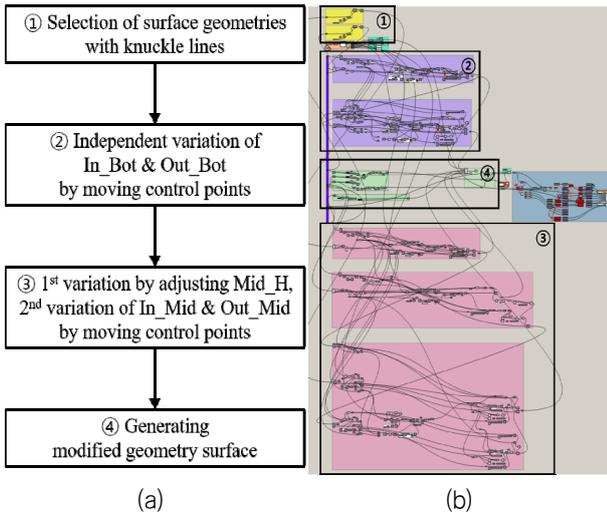


Fig. 5 Schematics of (a) procedure and (b) Grasshopper code for hull form variation

2.3 최적화 및 수치 기법

본 논문에서는 최적화 소프트웨어 HEEDS(Hierarchical Evolutionary Engineering Design System) Ver. 2021.2를 3D 모델링 소프트웨어 Rhinoceros Ver. 6 및 CFD 해석 소프트웨어 STAR-CCM+ Ver. 16.06를 연동하여 선형 최적화를 수행하였다. 여러 제약 조건을 만족함과 동시에 다변수 설계를 빠르게 해결할 수 있는 HEEDS는 각 설계에 성능 등급을 부여하여 최적화를 수행하게 된다. CFD 해석을 통해 도출된 모형선의 전 저항과 선체의 배수량을 최적화의 목적함수와 제약조건으로 선정하였다. 최적화 과정에서 성능 값(performance value)은 목적함수와 제약조건을 이용하여 탐색의 방향을 선정하게 되며 식 (1)과 같이 정의된다 (HEEDS MDO, 2021; Lee et al., 2015).

$$Performance\ value = \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{Nobj} \left(\frac{Lin\ Wt_i \times S_i \times Obj_i}{Norm_i} \right) - \sum_{j=1}^{Ncon} \left(\frac{Quad\ Wt_j \times Con\ Viol_j^2}{Norm_j^2} \right)$$

여기서 Nobj, Ncon 및 Norm, Norm_j는 각각 목적함수와 제약조건 개의 수, 절대값을 의미한다. 그리고 LinWt_i와 QuadWt_j는 목적함수와 제약조건에 대한 선형 및 2차 가중치로 기본값은 1과 10000으로 설정되어 있다. S_i는 목적함수가 최소 및 최대가 되는 경우 1과 -1의 값을 가지며 목적함수의 부호를 결정한다. Obj와 ConViol_j²는 목적함수 및 제약조건을 위반한 값이며 제약조건을 충족하는 경우 0의 값을 가진다. 따라서 제약조건을 위반할 시, 목적함수에 대한 보상이 감소하여 성능이 떨어진다. 이와 같은 방법으로 성능 값이 계산되며, 본 연구에서 사용한 최적화 알고리즘 SHERPA(Simultaneous Hybrid Exploration that is Robust,

Progressive and Adaptive)는 성능 값이 높은 설계를 선택하는 방향으로 최적화를 수행하게 된다.

본 연구에서는 저항성능을 평가하고자 3차원 비정상, 비압축성 난류 유동을 가정하였다. 따라서 이에 대응하는 지배방정식인 연속방정식과 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식은 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] + \rho \bar{g}_i \quad (3)$$

여기서 $\bar{\quad}$ 는 시간 평균된 값을 의미한다. \bar{u}_i 와 \bar{u}_j ($i, j = 1, 2, 3$)는 x_i 와 x_j ($i, j = 1, 2, 3$) 방향에 대한 평균 유속이며, ρ 는 유체의 밀도, \bar{p} 는 평균 압력, μ 는 유체의 점성 계수, \bar{g}_i 는 중력가속도이다. 또한, 식 (3)의 레이놀즈 응력 (Reynolds stress) 항인 $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 은 Reynolds Stress 난류 모델을 적용하였다. 자유수면 및 다상 유동을 고려하고자 유한체적법 (Volume of Fluid, VOF)을 적용하였으며, 청수와 공기를 해석에 고려하였다. 속도-압력 상호 연계는 Semi-implicit Method for Pressure-linked Equation(SIMPLE) 기법을 기반으로 계산되었으며, 유동에 따른 선박의 자세 변화를 고려하기 위해 STAR-CCM+의 DFBI(Dynamic Fluid Body interaction) 방법을 사용하였다. 대상 선박의 자세 변화는 선체 표면의 유체 압력 변화로 인한 종경사(trim) 및 침하량(sinkage)을 고려하였으며, 이를 제외한 나머지 운동은 구속한 채 해석하였다.

본 연구에 사용된 해석 영역 및 경계 조건을 Fig. 6에 나타내었다. 단동체 사이의 유동 간섭에 따른 저항의 영향을 평가하기 위해 전쪽에 대한 해석을 수행하였으며, 선박의 선미 수선(After Perpendicular, AP)을 원점으로 하였다. 해석 영역은 선체 길이 방향으로 4.0L_{pp}, 폭 방향으로 1.0d + 3.0L_{pp} 및 높이 방향으로 2.5L_{pp}를 사용하였다. 입구 및 상, 하부에는 균일류 경계 조건을 부여하였으며, 출구는 대류 경계 조건으로 설정하였다. 측면 경계 조건에는 대칭 경계 조건을 적용하였다.

해석을 위한 격자계의 선정을 위해 격자 의존성 테스트를 수행하였다. 격자 의존성 테스트에 사용된 격자수는 약 40만, 90만과 200만 개를 coarse, medium과 fine 격자 시스템에 각각 반영하였다. 격자 의존성 테스트 결과 coarse와 medium 격자 시스템 간의 R_{TM} 차이는 약 2.0 %이며, medium과 fine 격자 시스템 간의 R_{TM} 차이는 약 0.4 %이다(Fig. 7). Medium 및 fine 격자 시스템의 저항값은 큰 차이를 보이지 않음에 따라 본 연구에서는 최적화 탐색 시간의 효율성을 위해 medium 격자 시스템을 저항성능 평가에 사용하였다.

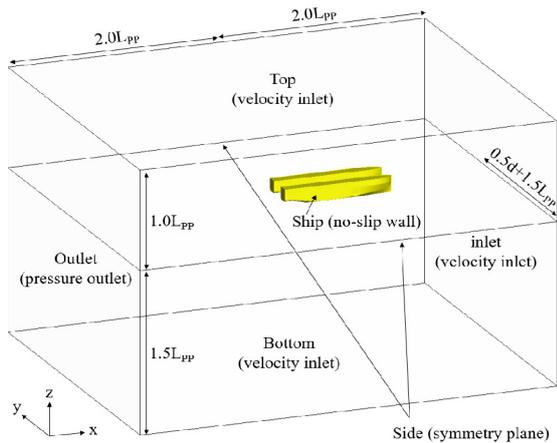


Fig. 6 Computational domain and boundary conditions

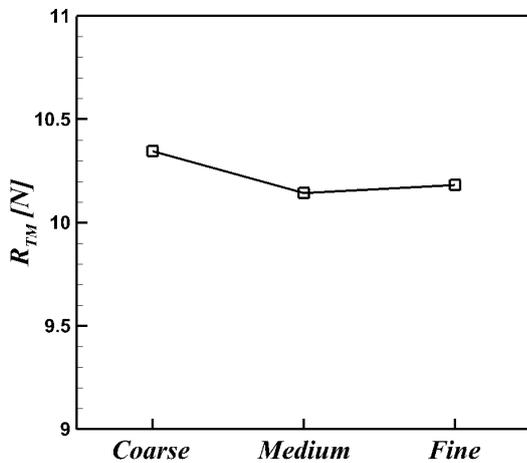


Fig. 7 Grid dependency test

3. 결과 및 검토

선형 변환기법과 저항성능 평가 기법을 바탕으로 선형 최적화를 수행하였다. 최적화에 적용된 설계 변수 및 제약조건의 범위를 Table 2에 나타내었다. 설계 변수는 기존선형의 변환 비율 범위와 그 간격을 바탕으로 설계 탐색에 적용되었으며, 과도한 배수량의 변화를 방지하기 위해 제한 조건의 범위를 설정하였다. 최적화는 총 400번의 성능값 탐색을 통해 수행되었으며, 도출된 최적선형의 주요 제원과 목적함수인 저항성능을 Table 3에 나타내었다. 실선의 전 저항을 예측하기 위해 ITTC 1957 방법을 사용하였다. 최적선형은 기존선형에 비해 모형선 및 실선 저항이 9.3 %와 11.4 % 개선되었음을 확인할 수 있었다. 제약조건인 배수량은 0.4 % 감소되어 제약조건인 0.5 % 이내를 만족한다.

너클라인 변화를 비교하기 위해 최적선형과 기존선형의 정면도와 횡단면적 곡선(Sectional Area Curve, SAC)을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)는 단동선형의 안쪽 선체를 나타낸 것으로 in_bot은 최적선형과 기존선형의 차이가 크지 않으나, In_Mid의 경우 중력 반대 방향으로 올라간 것을 볼 수 있다. Fig. 8(b)의

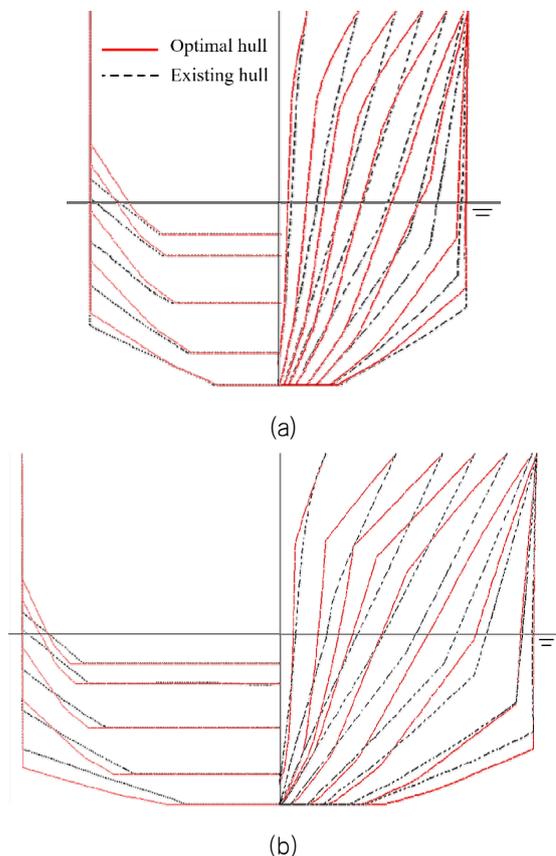
Table 2 Optimization conditions

	Design parameter			Evaluation number
	Min	Max	interval	
In_bot	50 %	200 %	0.5 %	400
Out_bot				
Mid_H				
In_mid				
Out_mid				
Constraint condition				
	Lower	Upper		
DISV	-0.5 %	+0.5 %		

Table 3 Results of optimization

	Optimal hull	Existing hull	diff.
LCB [m]	8.584	8.683	-1.1 %
VCB [m]	0.556	0.563	-1.2 %
WSA [m ²]	115.122	115.637	-0.4 %
DISV [m ³]	47.743	47.926	-0.4 %
R_{TM} [N]	9.318	10.268	-9.3 %
R_{TS} [kN]	6.265	7.0677	-11.4 %
Trim [deg]	0.0304	0.0367	-17.5 %
Sinkage [m]	-0.00546	-0.00525	3.9 %

바깥쪽 선체는 최적선형의 Out_Bot이 선체 폭이 증가하는 방향으로 이동하였으며, Out_Mid는 중력 반대 방향으로 이동하였다.



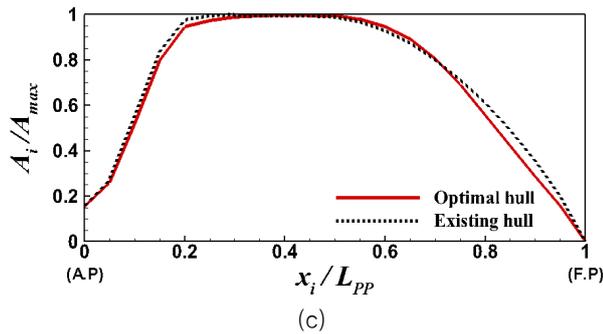


Fig. 8 Comparison of body plan of existing and optimal hulls : (a) inner side hull (b) outer side hull and (c) SAC curve

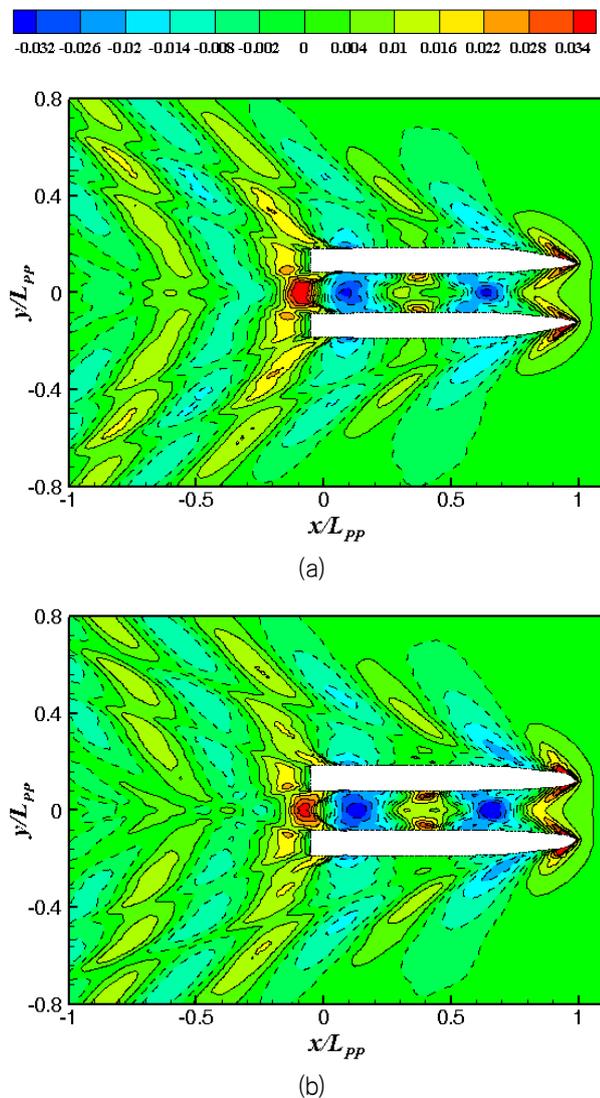


Fig. 9 Contours of wave elevation in the free-surface plane for (a) optimal and (b) existing hulls

최적선형은 전반적으로 선수 쪽으로 갈수록 In_Mid와 Out_Mid가 자유수면 근처에서 큰 변형을 가지며 이로 인해 최적선형의 선수 폭이 좁아진다. 선미부 또한 선체 뒤쪽으로 갈수록 In_Mid와

Out_Mid의 변화로 인해 급격한 경사를 보이며 너클라인이 기존 선형 대비 올라갔다. Fig. 8(c)는 최적선형 및 기존선형을 20개의 station으로 나누어 각 station에서의 단면적을 비교한 SAC 곡선이다. 가로축은 i번째 station에서 x좌표값을 L_{PP} 로 무차원화한 것이며, 세로축은 i번째 station에서의 횡단면적 A_i 를 최대 횡단면적 A_{Max} 로 무차원화한 것이다. 앞서 In_Mid와 Out_Mid의 큰 변형으로 인해 트랜섬 부근의 너클라인이 이동하고 선수부의 폭이 좁아짐으로 인해 횡단면적이 감소한 것을 확인할 수 있다.

선형 최적화를 통해 도출된 최적선형과 기존선형의 저항성능을 분석하기 위해 선체 주위의 파형을 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9(b)의 기존선형 대비 Fig. 9(a)의 최적선형은 어깨파의 높이가 감소하였음을 확인할 수 있다. 또한 두 단동선형의 상호 간섭으로 인해 발생하는 파의 높이가 기존선형에 비해 최적선형이 더 낮음을 확인할 수 있다. 반면 선미 근처에서 발생하는 파는 최적선형이 더 큰 값을 가진다. 이는 최적선형의 경우 선미 부근에서

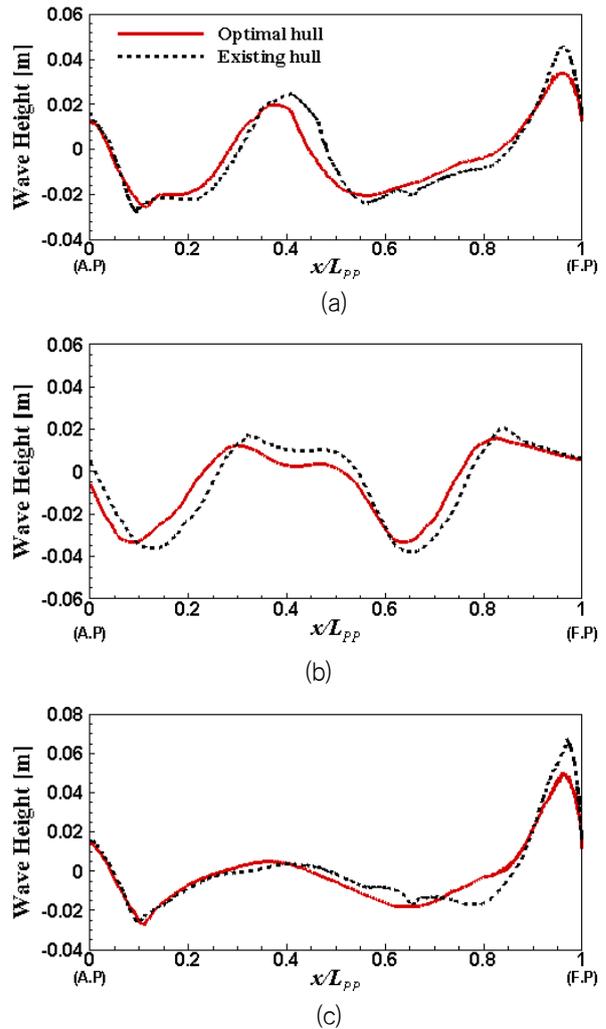


Fig. 10 Wave profiles of optimal and existing hull at the sections of (a) inner side, (b) center side and (c) outer side
선체의 In_Mid가 자유수면 위로 올라가는데, 이때 변형된 선체

형상에 따라 유동이 상대적으로 빨라지면서 선미 근처에 발생하는 파의 높이를 증가시키게 된다. 상대적으로 두 단동선형의 상호 간섭에 의한 파의 영향이 저항성능에 더 큰 영향을 준다. 이러한 파형의 분포는 Table 3에서 나타난 최적선형과 기존선형의 저항성능 차이를 설명해준다.

선형 최적화에 따른 파고 높이를 비교하고자 최적선형 및 기존선형의 선체 측면과 쌍동 선체의 가운데 부분에서 파고 변화를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 선체의 안쪽 파고를 나타낸 것으로 Fig. 8(a)에서 자유수면 주위의 너클라인이 위쪽으로 이동함에 따라 선수가 날렵한 형상을 가지게 되면서 선수파가 상대적으로 감소한 것으로 볼 수 있다. 또한 선수파에서 어깨파로 이어지는 파고의 기울기가 완만해진다. Fig. 10(b)는 쌍동 선체의 가운데 지점의 파고를 나타낸 것으로 앞서 선체 안쪽에서 선수파가 개선됨에 따라 양측 선수에서 발생하는 선수파의 중첩 현상이 완화되었으며 이러한 현상이 선체 중반부까지 이어진다. Fig. 10(c)는 바깥쪽 선체에 작용하는 파고를 나타낸 것으로 Fig. 10(a)와 동일하게 Fig. 8(b)의 바깥쪽 선체의 자유수면 부근 너클라인이 선수부로 오면서 급격히 꺾임에 따라 선수부의 폭이 좁아지면서 선수에 작용하는 파의 높이가 낮아짐을 확인하였다.

Fig. 11은 선체 표면에 작용하는 압력 분포를 나타내었다. 선체에 가해지는 압력은 식 (4)과 같이 압력계수로 무차원화 하였다.

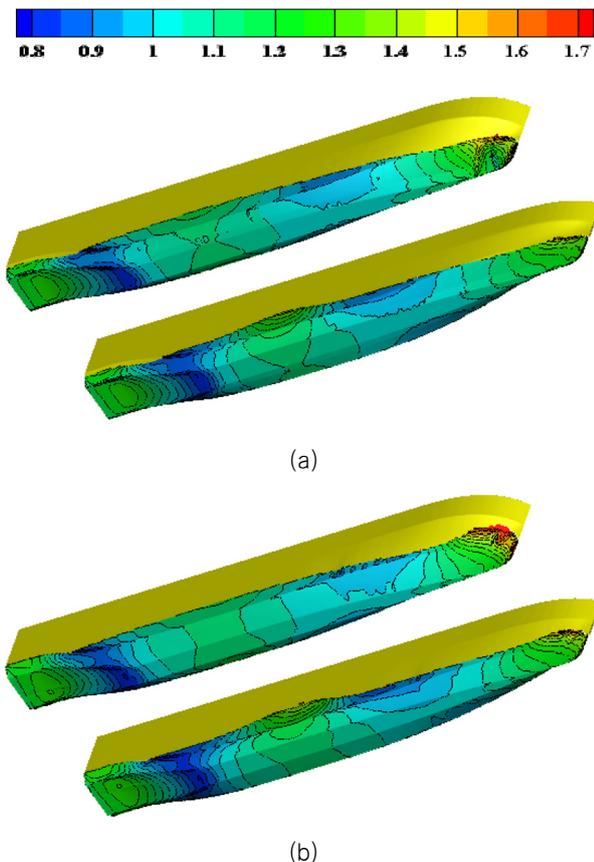


Fig. 11 Pressure distribution on (a) optimal and (b) existing hull

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho U^2} \quad (4)$$

여기서 p 는 선체가 받는 압력, p_0 는 정수압, U 는 유체의 선속이다. 앞서 선수부의 폭이 좁아지면서 파고가 개선됨에 따라 선수부에 작용하는 압력은 최적선형에서 상당히 감소하였음을 확인할 수 있으며, 선측에서 작용하는 낮은 압력의 분포 크기도 기존선형에 비해 감소하였음을 확인할 수 있다. 이러한 압력 분포의 차이는 Table 3의 저항성능 차이를 설명한다.

4. 결론

본 연구는 소형 쌍동선을 대상으로 너클라인 변환을 기반으로 한 선형변환 코드를 작성하여 선형 최적화 기법을 개발하였다. 선형변환 과정을 자동화하기 위해 자유수면 아래에 위치한 너클라인을 설계 변수로 설정하였다. 자유수면 근처의 너클라인의 이동을 위해 변수 In_Mid, Out_Mid를 설정하였으며, 두 라인이 선수 수선과 맞닿는 지점의 높이 및 트랜섬의 형상 변화를 위해 Mid_H 변수가 정의되었다. 또한 선저 근처 너클라인의 변화를 위해 변수 In_Bot, Out_Bot을 지정하였다. 최적선형을 도출하는 과정에서 각각의 너클라인이 기존선형의 주요 제원을 벗어나지 않도록 선체의 위치에 따른 가중치가 적용되었다.

선형 최적화를 통해 도출된 최적선형은 기존선형에 비해 모형선 저항 기준 9.3 %의 성능 개선을 보였다. 도출된 최적선형은 자유수면 부근의 너클라인이 중력 반대 방향으로 변환되었으며 이로 인해 선체 중앙부에서 선수부로 이동할수록 선수가 급격하게 좁아지는 형상을 가진다. 선형변환으로 인한 최적선형의 선수영역에서 폭이 감소함으로써 기존선형 대비 선수파의 높이가 개선되었으며 선수에서 발생한 파의 중첩 현상으로 두 단동체 사이에 생성되는 파의 기울기가 완만해짐을 확인하였다. 또한 선체 표면 선수부 및 선측의 압력 분포가 개선되었다.

개발된 선형 최적화 기법으로 소형 쌍동선의 저항성능 향상을 확인하였다. 이를 활용하여 향후 어선 및 보트 등 다양한 소형 선박의 선형 최적화가 가능할 것으로 판단된다.

후기

이 연구는 한국산업기술진흥원의 부산 암모니아 친환경 에너지 특구 사업 중 암모니아 기반 연료전지 하이브리드 친환경 선박 실증(P0020619) 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Aakko-Saksa, P.T., Lehtoranta, K., Kuittinen, N., Järvinen, A., Jalkanen, J.P., Johnson, K., Jung, H., Ntziachristos, L., Gagné, S., Takahashi, C., Karjalainen, P., Rönkkö, T.

- and Timonen, H., 2023. Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options. *Progress in Energy and Combustion Science*, 94, 101055.
- Choi, H.J. and Park, D.W., 2013. Wave-resistance performance analysis of the twin hull for a type of the asymmetric and symmetric mono hull. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(1), p.78-84.
- Huang, F. and Chi, Y.A.H.G., 2016. Hull form optimization of a cargo ship for reduced drag. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 28(2), pp.173-183.
- HEEDS MDO 2021.2 Getting Started Guide
- Lee, Y.K., Shin, J.H., Park, I.H., Kim, S., Lee, K.Y. and Choi, Y.S., 2015. Mixed flow pump impeller diffuser optimization method using CFX and HEEDS. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 39(10), pp.831-842.
- Lee, J., Park, D.M. and Kim, Y., 2017. Experimental investigation on the added resistance of modified KVLCC2 hull forms with different bow shapes. *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(2), pp.395-410.
- Lindstad, E., Dražen, P., Riiland, A., Sandaas, I. and Stokke, T., 2022. Reaching IMO 2050 GHG targets exclusively through energy efficiency measures. *SNAME Maritime Convention*. OnePetro.
- Kim, H.S. and Jeong, U.C., 2010. A study on the flow characteristics between two hull forms of catamaran Leisure boat. *Journal of Korean Society of Mechanical Technology* 12(1), pp.1-6.
- Kim, M., Park, D.W., 2015. A study on the green ship design for ultra large container ship. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 21(5), pp.558-570.
- Kim, M., 2016. A study on efficient approaches for grasshopper programming in architectural design process. *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 21(4), pp.453-461.
- Park, C.W. and Jeong, U.C., 2001. A study on the resistance performance of twin hull forms—the effect of distance between two hulls. *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, 3(1), pp.163-168.
- Park, D.W., Choi, H.J., 2012. Study for optimal hull form design of a high speed Ro-Pax ship on wave-making resistance performance. *Journal of Navigation and Port Research*, 36(10), pp.787-793.
- Park, J.H., Choi, J.E. and Chun, H.H., 2015. Hull-form optimization of KSUEZMAX to enhance resistance performance. *international Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(1), pp.100-114.
- Park, D.W. and Kim, I., 2022. A study on the optimization of main dimensions of a ship by design search techniques based on the AI. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 28(7), pp.1231-1237.
- Park, S.W., Kim, S.H. and Lee, I., 2022. Study on hull form variation of fore body based on multiple parametric modification curves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(2), pp.96-108.
- Shi, X. and Yang, W., 2013. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. *Automation in Construction*, 32, pp.125-135.
- Yu, J.W., Lee, C.M., Lee, I. and Choi, J.E., 2017. Bow hull-form optimization in waves of a 66,000 DWT bulk carrier. *international Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(5), pp.499-508.
- Zhang, Y., Kim, D.J., and Bahatmaka, A., 2018. Parametric method using grasshopper for bulbous bow generation. *2018 international Conference on computing, Electronics & Communications Engineering (icCECE)*, pp.307-310.



박정운

이종현

서장훈

박동우