

HOTCONTAINER를 사용한 컨테이너선의 선형 최적 설계에 관한 연구

최희종*[†] · 구현모**

* 전남대학교 조선해양공학과 교수, ** 전남대학교 조선해양공학과 박사과정

Study on the Automatic Hull-form Optimal Design of Container Carriers
Using HOTCONTAINERHee Jong Choi*[†] · Hyoun Mo Ku**

* Professor, Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

** PhD Candidate, Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약 : 본 논문에서는 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화와 관련하여 연구한 내용과 결과를 정리하였다. 컨테이너선은 일반적으로 프루우드 수 0.26 근처에서 운항하는 선박으로 이 속도에서 운항하는 선박 전용 선형 최적 설계 자동화를 구현하기 위하여 최적화 알고리즘, 선형 변경 알고리즘, 선박 성능 예측 알고리즘, 자동화 알고리즘 그리고 반복적 계산 기법을 적용하여 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화가 가능한 수치해석 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, HOTCONTAINER라고 명명하였다. 본 연구에서는 선형 최적 설계를 위한 설계 변수의 적절한 선정을 위하여 민감도 분석 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 개발된 선형 최적 설계 자동화 알고리즘의 신뢰성과 실선 적용성을 파악하기 위하여 세계적으로 다양한 연구가 진행된 컨테이너 선박인 KCS 선박을 대상 선박으로 하여 선형 최적 설계 자동화 수치해석을 수행하여 그 결과물로서 최적 선박을 도출하고, 대상 선박과 최적 선박의 조파저항과 파계 그리고 파고를 비교하였다. 결론적으로 최적 선박이 대상 선박과 비교하여 조파저항이 47.63% 감소한 것을 볼 수 있었으며, 배수량과 접수 표면적은 각각 0.50%, 0.39% 감소한 것을 볼 수 있었다.

핵심어 : 컨테이너선 선박, 선형 최적 설계, 민감도 분석 알고리즘, 선형 자동 변경 알고리즘, 최적화 알고리즘, 선박 성능 예측 알고리즘, 자동화 알고리즘, 반복적 계산 기법

Abstract : In this paper, the research contents and results related to the automation of the hull-form optimal design of container ships are summarized. A container ship is a ship that generally operates near Froude number of 0.26. To implement hull-form optimal design automation for ships operating at this speed, an optimization algorithm, a hull-form change algorithm, a ship performance prediction algorithm, an automation algorithm, and an iterative calculation technique were applied to develop a numerical analysis computer program that enables hull-form optimal design automation of the container ship, and it was named HOTCONTAINER. In this study, a sensitivity analysis algorithm was developed and applied to appropriately set design variables for hull-form optimal design. To understand the reliability and real ship applicability of the developed algorithm, a numerical analysis was performed on KCS(KRISO Container Ship), a container ship that has been studied in various ways worldwide. Consequently, the optimal ship was derived, and the wave resistance, wave pattern, and wave height of the target and optimal ship were compared. In conclusion, compared the target ship, the optimal ship a 47.63% decrease in wave resistance, and the displacement and wet surface area decreased by 0.50% and 0.39%, respectively.

Key Words : Container ship, Hull-form optimal design, Sensitivity analysis algorithm, Hull-form automatic modification algorithm, Optimization algorithm, Ship performance prediction algorithm, Automation algorithm, Iterative calculation technique

1. 서 론

IMO 2020의 전면적인 시행으로 황 함량이 0.5% 미만의 환경 친화 연료이지만 가격 측면에서 더 비싼 초저유황 연료

유(Very low sulphur fuel oil)를 사용해야 하는 새로운 글로벌 규제로 인하여 선박 연료비가 급증하였으며, 이로 인한 추가 연료 비용은 소비자, 즉 화주에게 전가되어질 것으로 예상되기 때문에 이 문제에 대한 해운 관계자들의 관심이 급증하고 있다.

[†] Corresponding Author : choihj@jnu.ac.kr, 061-659-7154

HOTCONTAINER를 사용한 컨테이너선의 선형 최적 설계에 관한 연구

선박 연비를 결정하는 주요 요인으로는 선박 유형 및 크기, 엔진 유형 및 효율, 선박 속도 및 운항 조건, 친환경 기술 및 연료 등이 있으며, 선박 연비를 향상하기 위해서 여러 가지 기술이 개발되고 있으나 그중에서 가장 직접적으로 선박 연비와 관계된 기술은 선박 형상 설계 기술이다.

선박 연비 향상을 위한 연구는 조선공학사 역사만큼 꾸준한 연구가 진행이 되어 왔다. 특히 세계 경제가 고유가 시대에 접어들면서 선박 연비 향상을 위한 연구는 관련 분야 과학자들의 많은 관심을 받았으며, 이 같은 관심은 이 분야의 상당한 발전으로 이어져 선박 연비 향상과 관련된 많은 연구가 발표되고 있다.

선박 연비 향상 기술 중 주요 기술인 선형 최적 설계 기술은 최적화 기법과 수치해석 알고리즘에 의존하여 선형을 설계한다는 관점에서 광범위한 연구가 진행되었다.

선박 형상 설계 최적화를 위해 사용되는 핵심 기술은 기하학적 모델링, 유체역학적 분석, 최적화 기술 등으로 구성되며, 선형 설계에 이러한 기술의 구현 및 적용은 각 기법에 대한 충분한 이해, 최적화 과정에서의 실용적인 설계 경험과 방법론의 사용 등이 필요로 된다(Campana et al., 2006; Campana et al., 2009; Maisonneuve et al., 2003; Min et al., 2004).

선박 형상 설계 최적화의 핵심 기술의 발전과 함께 SBD (CFD simulation-based ship design)도 선박 형상 설계 최적화에 적절히 적용될 수 있을 정도로 지속적 개선을 이루었으며, 최근에는 CFD 시뮬레이션을 통해 안정적인 선박의 저항 성능이나 추진 성능 같은 선박의 주요 성능을 예측하는 도구로써 광범위하게 사용되고 있다(Peri and Campana, 2005; Saha et al., 2005; Stern et al., 2001; Tahara et al., 2004).

선박 형상 설계는 운항 속도와 밀접한 관계가 있으며, 선형 최적 설계에 있어서 설계 변수 선정, 설계 변수 위치, 설계 변수의 적용 범위 등 설계 변수의 파라미터 선정에 있어서 선박의 선속에 따라 서로 다른 가이드라인이 적용되어야 할 필요가 있다.

컨테이너선은 대부분 프루우드 수(Froude number) 0.26 정도에서 운항하는 선박이고 대형 선박 중에서는 비교적 고속에서 운항하는 선박으로, 소형 선박인 고속 활주선이 일반적으로 채택하는 차인라인(chine line) 같은 불연속 선이 거의 없으며, 전반적으로 선박 형상이 부드럽고 유체가 부드럽게 빠져나갈 수 있는 유체역학적으로 부드러운 선형을 가진다.

본 논문에서는 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화와 관련하여 연구한 내용과 결과를 정리하였다. 컨테이너선에 적합한 선형 최적 설계 자동화를 구현하기 위하여 최적화 알고리즘, 선형 변경 알고리즘, 선박 성능 예측 알고리즘, 자동화 알고리즘 그리고 반복적 계산 기법을 적용하여 선형 최적 설계 자동화가 가능한 수치해석용 프로그램을 개발하였으며

HOTCONTAINER(Hull-form Optimization Tool for a Container Carrier)라고 명명하였다.

HOTCONTAINER는 다년간의 연구를 수행한 결과로 개발된 선형 최적 설계 자동화 프로그램으로, 선형 변경 알고리즘인 종 모양 변형 함수법(Bell-shaped modification function)과 널리 알려진 NURBS(non-uniform rational B-spline) 기하 모델법 등을 적용하였다. 선박의 조파저항 성능을 예측하기 위하여 포텐셜기저 패널법(potential-based panel method)을 적용하였으며, 선박 형상의 진화 방향을 예측하기 위한 최적화 기법으로는 비선형 최적화 알고리즘인 순차적 이차 프로그래밍 기법(sequential quadratic programming)법을 적용하였다.

HOTCONTAINER에 적용된 기술 중 핵심적인 것으로 설계 변수의 효율적이고 적절한 선정을 위하여 민감도 분석 알고리즘(Sensitivity analysis algorithm)을 새롭게 개발하여 적용하였다.

개발된 HOTCONTAINER의 신뢰성과 실선 적용성을 파악하기 위하여 세계적으로 다양한 연구가 진행된 컨테이너 선박인 KCS(KRISO Container Ship)을 대상 선박으로 하여 수치해석을 수행하여 선형 최적 설계 자동화의 결과물인 최적 선박을 도출하였으며, 대상 선박과 최적 선박의 조파저항 계수와 파계 그리고 파고를 비교 및 검토하였다.

2. HOTCONTAINER

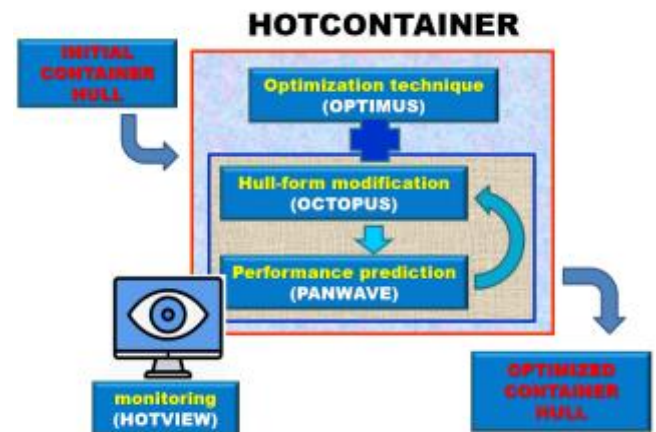


Fig. 1. HOTCONTAINER (Choi, 2021).

Fig. 1에 나와 있는 바와 같이 HOTCONTAINER는 5개의 모듈로 구성된다. 최적화 모듈인 OPTIMUS에서는 선형 최적 설계의 최적 설계 방향을 탐색하기 위한 모듈이고, 유동 해석 모듈인 PANWAVE는 선박 성능 예측을 위한 모듈이다. 선형 변경 모듈인 OCTOPUS는 선형을 자동으로 변경하기 위하여

개발한 모듈이고, 국소 변경 모듈인 HOTPART는 선형을 체계적으로 변경하여 그 결과(조파저항 계수, 배수량, 접수 표면적의 변화)를 보여주는 모듈로서 선박의 어떤 부분을 변경하면 선박의 성능이 어떻게 향상되는지를 탐색하기 위하여 사용되며, 이 모듈에서는 중요한 기술 요소인 민감성 분석을 통하여 설계 변수의 위치, 범위 등이 결정되게 된다.

마지막으로 모니터링 모듈인 HOTVIEW는 선형 최적 설계의 전 과정을 동영상으로 만들어 선형 최적 설계가 순조롭게 진행되고 있는지를 모니터링할 수 있도록 구현된 기술이다.

Fig. 1에서는 선형 최적 설계와 직접적으로 관련된 4개의 모듈이 유기적으로 연동되는 방식에 대하여 설명하고 있다(Choi, 2021).

HOTCONTAINER의 선형 최적 설계 상세 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 대상 선박이 선정되면 HOTPART를 사용하여 민감도 분석을 수행하고, 민감도 해석 결과를 바탕으로 설계 변수를 선정한다. 설계 변수가 선정되면 최적화 기법과 목적함수를 선택하고 선형 최적 설계를 수행한다.

HOTCONTAINER는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 2개의 반복 작업으로 구성되며, 내부 반복 작업(Green)와 외부 반복 작업(Red)로 구성된다.

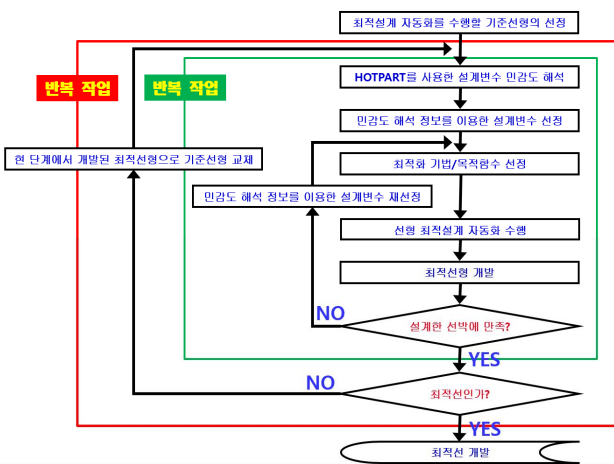


Fig. 2. Procedure for automatic optimal hull-form design of HOTCONTAINER.

대상 선박이 선정되면 대상 선박에 대한 민감도 분석을 수행하여 설계 변수를 선정하고 선형 최적화를 수행하게 된다(내부 반복 작업). 이 결과 최적 선형이 도출되면 도출된 최적 선형에 대하여 다시 민감도 분석을 수행하고 최적 선형에 대한 설계 변수를 재선정한 후 선형 최적화를 다시 수행하게 된다(내부 반복 작업). 내부 반복 작업을 반복적으로 수행하여(외부 반복 작업) 최종적으로 최적 선형을 도출하게 된다.

2.1 최적화 모듈(OPTIMUS)

최적화 모듈(OPTIMUS)에서는 최적화 기법으로 로컬 영역에 대한 최적점 탐색기법인 비선형 최적화 알고리즘인 순차적 이차 프로그래밍 기법과 글로벌 영역에 대한 최적점 탐색기법인 PSO(Particle Swarm Optimization)를 채택하고 있다(Choi, 2021; Choi, 2015; Park and Choi, 2012).

비선형 최적화 알고리즘인 순차적 이차 프로그래밍 기법은 빠른 수렴성이라는 장점을 가지고 있어서 목적함수의 계산에 많은 시간이 소요되는 경우 매우 효과적인 최적화 기법이다. 그러나 로컬 영역에 대한 최적점을 찾는다는 단점으로 인하여 정확한 최적점을 찾기가 어렵다.

특히 설계 변수가 많은 경우에는 더욱 이와 같은 현상은 두드러지며, 초기 시작점으로 어떤 점을 선택하느냐에 따라서 다른 최적점에 도달할 수 있으므로 이에 대한 시행착오가 필요하다.

글로벌 영역에 대한 최적점 탐색 기법인 PSO 기법은 정확한 최적점을 찾는 데는 매우 유용한 것으로 생각되지만 수많은 목적함수를 찾아야 한다는 단점으로 인하여 목적함수를 계산하는 시간이 많이 소요되는 경우 적용하기가 어려운 최적화 기법이다.

HOTCONTAINER는 목적함수 예측에 비교적 계산 시간을 많이 소모하는 수치해석 기법을 채택하고 있으므로 PSO 기법보다 비선형 최적화 알고리즘인 순차적 이차 프로그래밍 기법을 적용하게 대부분의 수치해석을 수행하고 있다.

2.2 유동해석 모듈(PANWAVE)

유동해석 모듈(PANWAVE)은 선박 주위의 유동장과 조파저항 계수를 구하는 프로그램이다. 포텐셜 유동 해석기법인 패널법을 적용하였다.(Choi, 2021; Choi, 2020; Choi et al., 2011; Choi, 2013)

요트나 고속선형이 주로 채택하는 차인라인 등 복잡한 형상을 가진 선박의 수치해석을 위하여 개발된 패널 절단법(Panel cutting method)과 가변 자유수면 패널법(Variable free surface panel method)을 적용하였으며, 자유수면 경계조건의 비선형성을 만족하기 위하여 반복법을 적용하여 수치해석 프로그램을 개발하였다.

최적화 기법을 적용한 선형 최적 설계 자동화에 있어서 중요한 요건 중 하나가 해석 해의 신뢰성과 해석 코드의 내구성이다. 어떤 상황에서도 해석 해를 낼 수 있어야 하며, 그 해가 신뢰할 수 있어야 한다.

HOTCONTAINER를 이용하여 선박을 설계하는 과정 중 수천 척의 선형이 개발된다. 수천 척의 선형에 대하여 수치해석을 수행할 때 한 척에서도 수치해석 상의 문제가 발생하면 선형 최적 설계 자동화는 실패한다.

유동해석 모듈(PANWAVE)은 다년간의 시행착오를 거치면서 수정되고 보완된 조파저항 예측 프로그램이다.

2.3 선형 변경 모듈(OCTOPUS)

선형 변경 모듈(OCTOPUS)는 선형 최적 설계 자동화 과정에서 선형을 자동으로 변경하기 위하여 개발된 선형 변경 모듈이다. OCTOPUS를 개발하기 위하여 NURBS 기법과 종 모양 분포 함수 기법 등 다양한 기하학적 모델링을 적용하였으나, 선형 변경을 수행할 때는 예측이 가능하고 제어가 편한 종 모양 분포 함수 기법이 주로 적용하였다(Choi, 2015; Choi, 2016; Choi, 2020; Choi, 2021).

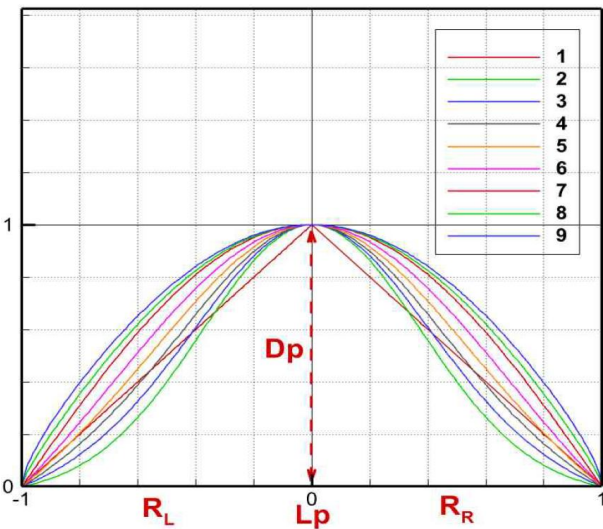


Fig. 3. Applied distribution curves for hull-form modification.

Fig. 3의 선형 변경을 위하여 적용된 분포 곡선이다. 그림에서 L_p 는 기준점이다. R_L 과 R_R 은 선형 변경이 이루어지는 범위이고 D_p 는 기준점의 이동 거리이다. L_p 가 D_p 만큼 이동하면 선체 표면의 점들도 분포 곡선(distribution curve)에 따라서 이동하게 설계했다.

선박의 선체 표면 형상은 매우 복잡한 기하학적 형상을 가지므로 선체 표면의 위치에 따라 형상에 적절한 분포 곡선을 적용할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 다양한 시행착오 결과 9개의 분포 곡선을 적용하게 되었으며, 다른 분포 곡선이 필요한 경우 외부에서 분포 곡선을 입력할 수 있게 수치해석 컴퓨터 프로그램을 설계하였다.

Fig. 4는 선미에서 길이 방향으로 163.3m 지점에 있는 스테이션을 기준선으로 하여, 기준선이 선수 방향으로 7m 이동하였을 때 선도의 변화를 나타낸 것이다. 선형의 연속성을 유지하기 위하여 기준선을 중심으로 선미 방향으로 50m, 선수 방향으로 50m 범위에 있는 스테이션은 Fig. 3의 분포 곡선 No. 3에 따라 이동하였다.

$L_x=163.3m, R_L=50m, R_R=50m, D_x=7m$

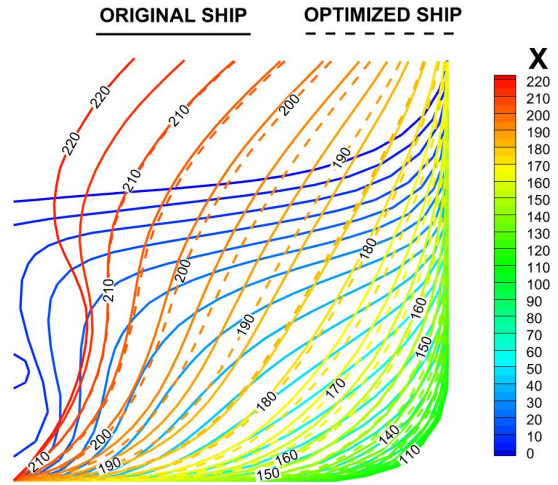


Fig. 4. Comparison of lines for station shift.

$D_n=0.7m, R_{x1}=30m, R_{xu}=30m, R_{z1}=5m, R_{zu}=5m$

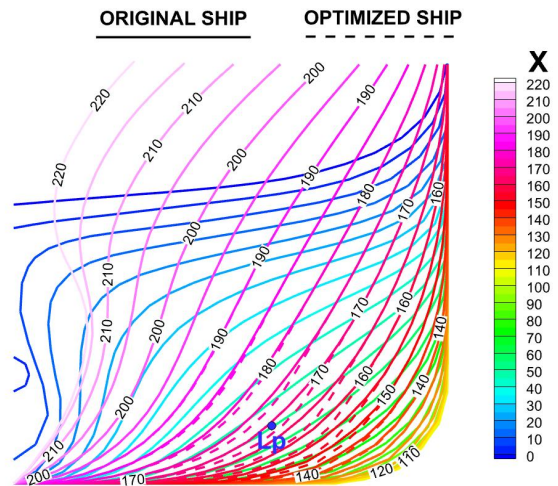


Fig. 5. Comparison of lines for shift of a point on hull surface.

Fig. 5은 그림에서 보는 바와 같이 선체 표면에 있는 L_p 점을 기준점으로 하여, 기준점이 선체 표면과 법선 방향으로 0.7m 이동하였을 때 선도의 변화를 나타낸 것이다. 선형의 연속성을 유지하기 위하여 기준점을 중심으로 선미 방향으로 30m, 선수 방향으로 30m, 기선(base line) 방향으로 5m 그리고 상갑판 방향으로 5m 범위에 있는 선체 표면의 곡면은 양방향으로 Fig. 3의 분포 곡선 No. 3에 따라 이동하였다.

Fig. 6은 그림에서 보는 바와 같이 선측 프로파일에 있는 L_p 점을 기준점으로 하여, 기준점이 선측 프로파일과 법선 방향으로 0.8m 이동하였을 때 선도의 변화를 나타낸 것이다.

선형의 연속성을 유지하기 위하여 기준점을 중심으로 선미 방향으로 20m, 선수 방향으로 20m 범위에 있는 선측 프로파일의 곡선은 Fig. 3의 분포 곡선 No. 3에 따라 이동하였다.

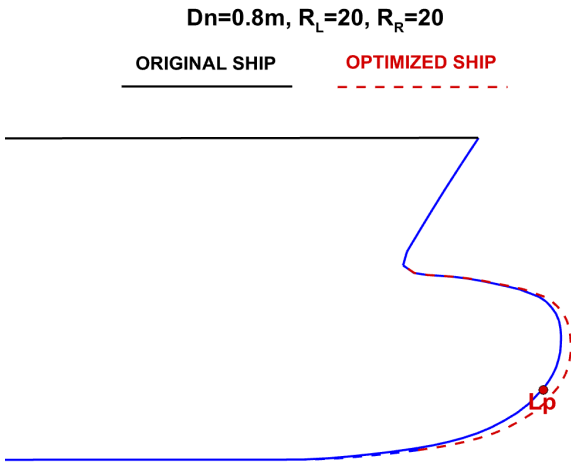


Fig. 6. Comparison of profiles for shift of a point on profile.

HOTCONTAINER에서 컨테이너선의 선형 변경은 스테이션, 버톡라인, 워터라인, 선측 프로파일, 선체 표면에서 이루어진다. 스테이션, 버톡라인 그리고 워터라인은 선도의 라인을 이동하는 방식으로 이루어지고, 선측 프로파일과 선체 표면은 일정 점을 이동하는 방식으로 이루어진다(Choi, 2021).

버톡라인과 워터라인은 스테이션과 같은 방식으로 선형 변경이 이루어진다. 스테이션/버톡라인/워터라인을 이루는 모든 선과 선체 표면과 선측 프로파일의 모든 점은 설계 변수가 될 수 있다.

컨테이너 선박의 선형 최적 설계 자동화에서는 조파저항을 목적함수로 선정하여 수치해석을 수행하였다. 목적함수인 조파저항을 예측하기 위하여 포텐셜 유동 해석기법인 패널법을 적용하였는데, 패널법은 비점성 유동장 해석기법으로 수치해석에 걸리는 시간이 적다는 장점이 있어서 많은 수치해석 시간이 요구되는 선형 최적 설계 자동화에 적합한 것으로 판단된다. 그러나 비점성 유동장 해석 기법인 관계로 선수부 설계에는 효과적인 적용이 가능하지만, 난류 유동이 주를 이루는 선미부 유동장 해석에는 수치해석 결과의 신뢰성에 문제가 발생할 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 대상 선박의 선수부에 국한하여 선형 최적 설계 자동화를 수행하고자 하였다.

설계 변수의 선정에 선미 부분은 배제하고 선수 부분만 설계 변수로 선정하고자 하였으나, 버톡라인이나 워터라인의 변경과 같이 어쩔 수 없이 선미 형상에 영향을 미칠 수

있는 경우에는 식(1)을 적용하여 최대한 영향을 적게 하고자 하였다.

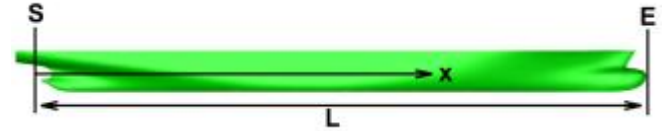


Fig. 7. Sketch for shift of D_p .

$$Dp_x = \frac{x}{L} Dp \quad (1)$$

Fig. 7과 식(1)에서 Dp_x 는 x위치에서의 로컬 이동량, Dp 는 버톡라인 또는 워터라인의 실제 이동량, L은 S에서 E까지의 거리, x는 S에서 x가 있는 스테이션까지 거리를 나타낸다.

식(1)을 적용하면 선미 변경을 최대한 적게 하면서 선박의 형상을 부드럽게 변경할 수 있다. 그리고 S의 위치를 선수 쪽으로 이동하면서 S와 E 내부의 점들만 변경할 수 있는 알고리즘도 적용하였다. 버톡라인이나 워터라인의 이동에 따른 선형 변경을 수행할 경우, 부드러운 선형의 변경을 위하여 S와 E의 적절한 선택이 필요하다.

2.4 국소변경 모듈(HOTPART)

국소변경 모듈(HOTPART)는 설계 변수를 선정하는 모듈이다. 선형 변경 모듈에서 설명한 스테이션, 버톡라인, 워터라인, 선체 표면 그리고 선측 프로파일에 대한 선과 점들에 대한 민감도 분석을 수행하여 선형 최적 설계에 적합한 선들과 점들을 선정하면 된다.

전체 선형 최적 설계 자동화 과정 중 가장 많은 시간이 소요되는 모듈이며, 현재 5개 부분에 대하여 각각 441번, 총 2205번의 선형 변경이 이루어진다. 민감도 분석의 전 과정은 자동으로 이루어질 수 있게 설계하였다.

민감도 분석을 통하여 설계 변수 위치, 설계 변수 이동의 하한과 상한, 설계 변수 이동에 따른 주변 선과 점들에 영향을 미치는 범위가 결정된다. 설계 변수가 선정되면 선형 최적화를 진행하게 되며, 보통 10개에서 15개 정도의 설계 변수를 선택하여 선형 최적화를 수행하게 된다.

설계 변수의 선정에 있어서 주의할 점은 선박 저항에 영향을 미치는 요소인 배수량과 침수 표면적이 크게 줄어들지 않으면서 조파저항이 많이 감소한다거나 또는 증가하면서도 조파저항이 감소하는 설계 변수를 선정하는 것이 최적화의 성공적 수행에 필수적이다.

본 연구에서는 민감성 분석 결과를 바탕으로 설계 변수의

이동 범위를 적절히 선택함으로써 배수량과 침수 표면적의 감소를 최소화하고자 하였다.

2.5 모니터링 모듈(HOTVIEW)

HOTCONTAINER를 이용하여 선형 최적화를 수행하는 과정 중 수천 척의 선형이 건조된다. 이 과정에서 생성된 수천 척 선박의 선도를 일일이 검토하고 비교하는 것은 현실적으로 불가능한 것으로 판단되며, 가능하다더라도 비효율적이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 진화되는 과정 중 생성된 일련의 선박들에 대한 동영상을 제작하여 설계자가 원하는 방향으로 진화하고 있는지를 모니터링할 필요가 있다고 판단되어 선형 변경 모듈인 OCTOPUS와 연계하여 선형 최적화의 후처리 공정으로 선박의 진화 또는 변화 과정을 동영상으로 제작할 수 있는 알고리즘을 HOTCONTAINER에 추가하였다(Choi, 2021).

HOTVIEW는 HOTCONTAINER를 이용하여 선형 최적 설계를 수행하는 과정에서 생성된 선박들을 모니터링하기 위하여 개발된 시각화 모듈로서 최적화 과정에서 생성되는 선박형상의 모니터링뿐 아니라 설계 변수의 선형과 관련된 민감도 분석 과정에도 적용되어 설계 변수의 선택과 관련된 직관을 제공한다.

3. 응용

본 논문은 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화에 관하여 연구한 것을 정리한 것이며, 연구를 위하여 개발되고 적용된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 선형 최적 설계 자동화를 위한 수치해석 프로그램인 HOTCONTAINER를 개발하였다.

개발된 프로그램의 신뢰성과 실선 적용성을 검증하기 위하여 컨테이너선에 대한 선형 최적 설계 자동화 수치해석을 수행하였으며, 대상 선박은 세계적으로 많은 연구가 진행된 선박인 KCS 선박이다.

Fig. 8은 대상 선박의 선도를 나타낸 것이고, Table 1은 대상 선박의 제원을 표기한 것이다(SIMMAN, 2014).

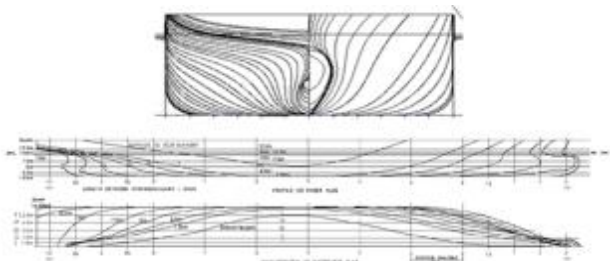


Fig. 8. Target ship (SIMMAN, 2014).

Table 1. Principal particulars of the target ship (SIMMAN, 2014)

Designation	Ship
LPP	230.0 m
LWL	232.5 m
Breadth	32.2 m
Draft	10.8 m
Depth	19.0 m
Fn	0.26

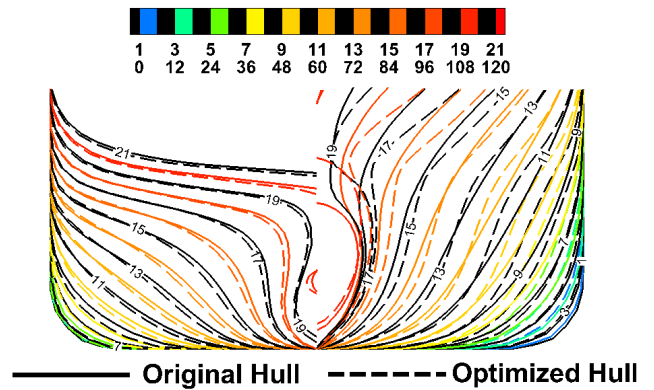


Fig. 9. Comparison of lines.

Fig. 9는 최적선(Optimized hull)과 대상선(Original hull)의 정면도(Body plan)를 비교한 것이다. 그림에서 x는 선박의 종방향 센터라인(center line)에서 선수 방향과 선미 방향 스테이션의 거리를 나타낸다. 대상선과 비교하여 최적선에서 벌브가 커지고 위로 올라가며, 벌브 옆의 표면은 불룩해지는 것을 볼 수 있다. 선수부의 벌브 근처에서는 배가 뚱뚱해지고 어깨 부분으로 가면서 날씬해지는 것을 볼 수 있는데, 전체적으로 곡률의 변화가 대상선과 비교하여 최적선에서 커진 것을 볼 수 있다.

Fig. 9에서 선미부에서도 선형이 변경된 것을 볼 수 있는데 Fig. 7에서 설명한 S를 선미 트랜섬 끝단으로 잡았을 경우 버톡라인과 워터라인의 이동에 따른 선형 변경이며, S를 선수 쪽으로 이동하면 이 같은 현상을 사라지나 선형 변경시 형상의 연속성 유지와 최적 설계 자유도의 확장 측면에서 불리할 것으로 판단된다.

Fig. 10-11은 최적선과 대상선의 선측 프로파일과 버톡라인을 서로 비교한 것이다. 그림에서 y는 선박의 횡방향 센터라인에서 선측 방향 버톡라인의 거리를 나타낸다. 대상선과 비교하여 최적선에서 벌브가 커지고 위로 올라가는 것을 알 수 있다. 선수 부분의 선체 표면에서 벌브 옆의 선체 표면이 불룩해지는 것을 볼 수 있다. 벌브 부근에서 선형 변

경이 크게 발생했음에도 선수 부분의 선형이 부드러운 선박 형상을 유지하는 것을 볼 수 있으며 전체적으로 선도가 자연스럽게 진화한 것을 볼 수 있다.

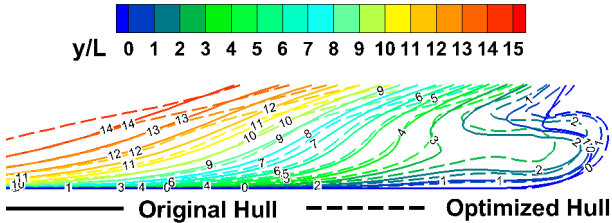


Fig. 10. Comparison of Buttock Line (bow part).

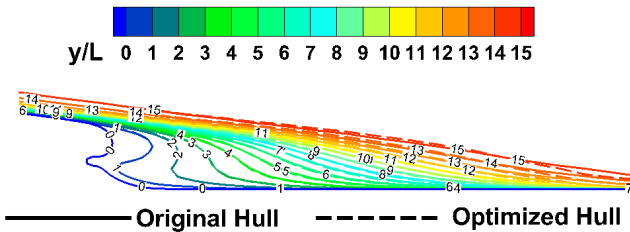


Fig. 11. Comparison of Buttock Line (stern part).

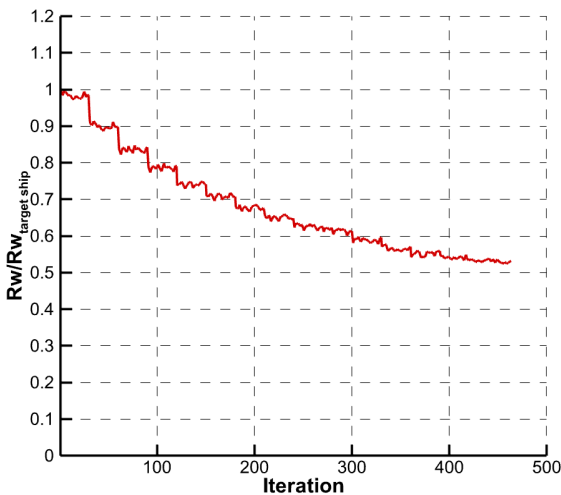


Fig. 12. Convergency history of the wave resistance.

Fig. 12는 선형 최적 설계 자동화 과정 중 목적함수인 조파저항이 대상선의 저항값에서 최적선의 저항값에 수렴하는 양상을 나타낸 것이다. 최적 설계 자동화 과정 중 총 463척의 선형이 개발되고, 각 선형에 대하여 목적함수인 조파저항이 계산되었다.

본 연구에서 선택한 최적화 기법인 순차적 이차 프로그래밍 기법에서는 각 설계 변수의 변화율과 그에 따른 조파저항의 변화율을 사용하여 최적 방향을 탐색하게 되는데 탐색한 최적값이 현 단계에서의 기준값과 비교하여 증가하는 방향으로 진화하는 경우 최적화가 수렴하였다고 판단하였다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 최적화 과정 중 목적함수가 갑자기 커지거나 작아지는 값이 없이 전반적으로 점층적으로 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 최적 설계 자동화에서 있어서 이 같은 경향은 매우 중요하다.

선형 최적 설계 자동화 과정 중 중간에 갑자기 커지거나 작아지는 값이 있다는 것은 대부분 선박 형상에 문제가 있어서 조파저항 수치해석의 오류를 의미하므로 선형 최적 설계 자동화의 실패를 의미한다.

이 같은 문제는 대부분 선형 변경과 변경된 선형에 대한 조파저항의 예측에서 발생하는데 다년간의 시행착오를 거쳐 수치해석 코드를 수정하고 보완하여 이 같은 치명적인 문제를 해결하였다.

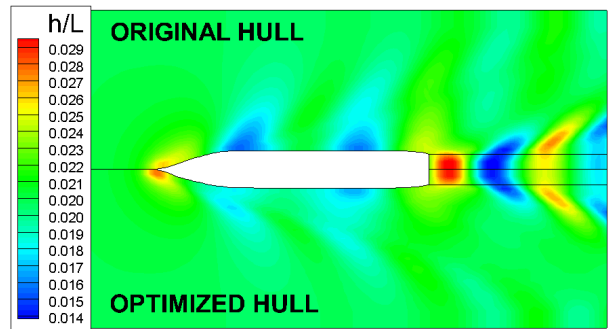


Fig. 13. Comparison of wave-pattern.

Fig. 13은 대상선과 최적선의 파계(wave pattern)를 비교한 것이다. 파계의 비교에서 대상선과 비교하여 최적선의 파가 상당히 줄어든 것을 볼 수 있다. 특히 선수부에 대하여서만 선형 최적 설계가 이루어진 관계로 선박의 벌브 근처와 어깨 부근에서 파가 눈에 띄게 줄어든 것을 볼 수 있으며, 선미부에서는 대상선과 비교하여 최적선과 파의 차이가 별로 나지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14-15은 길이 방향으로의 파고(wave height)를 비교한 것이다. Fig. 9는 선측 방향으로 $y/L=0.09$ 만큼 떨어진 위치에서 대상선과 최적선의 파고를 비교한 것이고, Fig. 15에서는 선측에서 $y/L=0.20$ 만큼 떨어진 위치에서 파고를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 선수부에서는 파고가 눈에 띄게 작아진 것을 볼 수 있는 반면, 선미부에서는 파고의 변화가 미미한 것을 볼 수 있다.

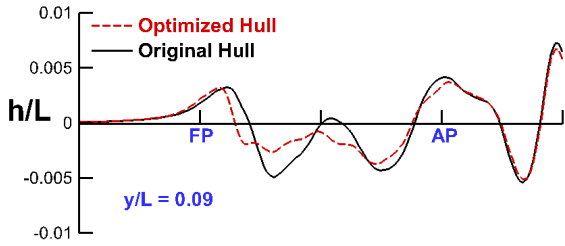


Fig. 14. Comparison of wave-profile (AP modified, Stern).

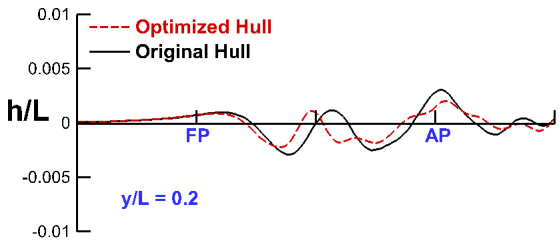


Fig. 15. Comparison of wave-profile (AP modified, Stern).

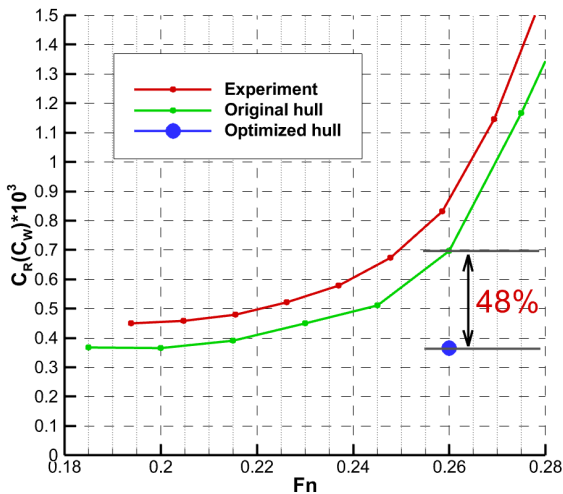


Fig. 16. Comparison of the wave resistance coefficient.

Fig. 16은 조파저항 계수(wave resistance coefficient)를 서로 비교한 것이다. 대상선에 대하여 모형시험을 수행하여 예측된 잉여저항 계수(residual resistance coefficient; Red line)와 대상선에 대하여 수치해석을 수행하여 예측한 조파저항 계수(Green line) 그리고 최적선에 대하여 수치해석을 수행하여 예측한 조파저항 계수(Blue point)를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 대상선에 대하여 모형시험을 수행하여 예측한 잉여저항 계수는 대상선에 대하여 수치해석을 수행하여 예

측한 조파저항 계수와 비교하여 다소 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 잉여저항 계수에는 조파저항 계수 외에 와류저항 등과 같은 점성과 관련된 성분이 포함되어 있어서 그런 것으로 판단된다.

Table 2. Hydro-static & Hydro-dynamic data

	Origin. Hull	Optim. Hull	$\Delta(\%)$
∇ (m ³)	52,030	52,225	+0.37
S_{wet} (m ²)	9,530	9,554	+0.25
$C_w \times 10^3$	0.697	0.365	-47.63

Fig. 16과 Table 2에서 보는 바와 같이 조파저항 계수가 48%가 감소한 것을 볼 수 있으며, 배수량은 0.37% 증가한 것을 볼 수 있고, 침수 표면적은 0.25% 증가한 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문은 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화에 관하여 연구한 내용과 결과를 정리한 논문이다.

컨테이너선의 일반적인 운항 속도인 프루우드 수 0.26에서 운항하는 선박의 선형 최적 설계 자동화에 적합한 수치해석 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 개발된 수치해석 프로그램을 적용하여 대상 선박인 KCS 선박에 대한 선형 최적 설계 자동화를 수행하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상 선박에 대한 선형 최적 설계 자동화를 수행하는 과정에서 총 463척의 선박이 개발되고 비교 검증을 통하여 최종적으로 최적선을 도출하였다. 최적선이 도출되는 과정에서 개발된 선형들은 조파저항 성능이 개선되면서 최적선으로 수렴하는 결과를 보였다.
2. 최종 선정된 최적선은 선형 최적 설계 자동화의 결과로서 도출된 최적선은 대상선과 비교하여 선수부의 벌브 근처에서는 배가 뚱뚱해지고 어깨 부분으로 가면서 날씬해지는 것을 볼 수 있는데, 전체적으로 곡률의 변화가 대상선과 비교하여 최적선에서 커지는 방향으로 진화하였다.
3. 최적선은 대상선과 비교하여 배수량은 0.37%, 침수 표면적은 0.25% 증가하였지만, 조파저항 계수는 48%가 감소하였으며, 파계와 파고의 비교에서 대상선과 비교하여 최적선에서 선수부의 파계와 파고가 눈에 띄게 감소하였다.

4. 본 연구의 주요 목적인 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화를 효율적으로 수행하기 위해서는 점성저항을 포함한 저항 추정 알고리즘을 사용해야 하지만 아직 선박 전체 저항을 줄이는 문제에는 하드웨어와 프로세서의 제약이 존재한다. 향후 이와 같은 문제를 해결하기 위한 연구를 진행할 필요가 있다.

결론적으로 본 연구의 주요 목적인 컨테이너선의 선형 최적 설계 자동화 기술을 개발하였으며, 민감성 분석 기법을 개발하여 선형 최적 설계 자동화 알고리즘에 적용하였다. 개발된 알고리즘이 컨테이너선의 선형 최적화 설계에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 보인다.

References

- [1] Campana, E. F., D. Peri, and Y. Tahara(2006), Shape optimization in ship hydrodynamics using computational fluid dynamics. *Computational Methods Applied Mechanics Eng.*, Vol. 196(1), pp. 634-651.
- [2] Campana, E. F., G. Liuzzi, S. Lucidi, D. Peri, V. Piccialli, and A. Pinto(2009), New global optimization methods for ship design problems. *Optimization Engineering*, Vol. 10, pp. 533-555.
- [3] Choi, H. J., H. H. Chun, I. R. Park, and J. Kim(2011), Panel cutting method-new approach to generate panels on a hull in Rankine source potential approximation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 225-292.
- [4] Choi, H. J.(2013), A Study for Wave-making Resistance Performance Prediction Method of a High-Speed Planing Ship. *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 15(1), pp. 75-81.
- [5] Choi, H. J.(2015), Hull-form optimization of a container ship based on bell-shaped modification function. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 478-489.
- [6] Choi, H. J.(2016), Research on hull-form optimization of a passenger ship using hull-form modification function algorithm with Gaussian distribution function. *Brodogradnja/Shipbuilding*, Vol. 67, No. 3, pp. 1-15.
- [7] Choi, H. J.(2020), A Study on Hull-form Design of a Passenger Ship According to the Location Change of Section Lines. *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 152-158.
- [8] Choi, H. J.(2021), A Study on the Automatic Hull-form Optimal Design of a Coastal Fishing Vessel using HOTBOAT. *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 31-37.
- [9] Maisonneuve, J. J., S. Harries, J. Marzi, H. C. Raven, U. Viviani, and H. Piippo(2003), Toward optimal design of ship hull shapes. In: 8th international marine design conference, IMDC03, Athens.
- [10] Min, K. S., Y. S. Lee, B. W. Han, and S. H. Kang(2004), Hull form optimization for fine higher-speed ships. In: 25th symposium on naval hydrodynamics, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, August 8-13.
- [11] Park, D. W. and H. J. Choi(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*, Vol. 36, No. 10, pp. 787-793.
- [12] Peri, D. and E. F. Campana(2005), High-fidelity models and multi-objective global optimization algorithms in simulation-based design. *Journal of Ship Research*, Vol. 49, pp. 159-175.
- [13] Saha, G. K., K. Suzuki, and H. Kai(2005), Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on the center plane of the catamaran. *Journal of Marine Science Technology*, Vol. 10, pp. 32-40.
- [14] SIMMAN(2014), <https://simman2014.dk/ship-data/moeri-container-ship/>.
- [15] Stern, F., R. V. Wilson, and H. W. Coleman(2001), Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations - part 1: methodology and procedures. *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 123, pp. 793-802.
- [16] Tahara, Y., F. Stern, and Y. Himeno(2004), CFD-based optimization of a surface combatant. *Journal of Ship Research*, Vol. 28, pp. 159-175.

Received : 2023. 12. 12.

Revised : 2024. 02. 07. (1st)

: 2024. 02. 13. (2nd)

Accepted : 2024. 02. 23.