

Practical Hull Form Design using VOB

Hyun-Cheol Kim*

*Faculty of Mechanical Engineering, Ulsan College, Ulsan, Korea

VOB를 이용한 선형 설계 실용화에 대한 연구

김현철*

*울산과학대학교 기계공학부

KEY WORDS: Sectional area curve 횡단면적 곡선, Volumetric balanced variation(VOB) 체적 균형 변환, Hull form design 선형 설계, Parametric design 파라메트릭 설계, Geometric wave profile(GWP) 기하학적 파형

ABSTRACT: : In general, ship hull form design is carried out in two stages. In the first stage, the longitudinal variation of the sectional area curves is adapted from a similar mother ship to determine the volume distribution in ships. At this design stage, the initial design conditions of displacement, longitudinal center of buoyancy, etc. are satisfied and the global hydrodynamic properties of the structure are optimized. The second stage includes the local designing of the sectional forms. Sectional forms are related to the local pressure resistance in the fore- and aft-body shapes, cargo boundaries, interaction between the hull and propeller, etc. These relationships indicate that the hull sections need to be optimized in order to minimize the local resistance. The volumetric balanced (VOB) variation of ship hull forms has been suggested by Kim (2013) as a generalized, systematic variation method for determining the sectional area curves in hull form design. This method is characterized by form parameters and is based on an optimization technique. This paper emphasizes on an extensional function of the VOB considering a geometrical wave profile. We select a container ship and an LNG carrier to demonstrate the applicability of the proposed technique. Through analysis, we confirm that the VOB method, considering the geometrical wave profile, can be used as an efficient tool in the hull form design for ships.

1. 서 론

1990년대 후반 이후에는 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 유동 해석의 정확도(Accuracy)가 높아짐에 따라 모형시험 이전에 선박의 성능을 CFD로 추정하여 선형설계에 반영하는 방법에 대한 연구들이 활발히 이루어져 왔다 (Harries, 1998; Markov and Suzuki, 2001; Peri et al., 2001; Kim et al., 2007; Lee and Choi, 2009). 이러한 연구들의 주요 목적은 다음과 같다.

(1) **설계 기준의 수치화** : 선체에 작용하는 저항을 CFD를 이용하여 정량화하고 선형 설계 기준으로 활용함으로써 기존의 경험적/주관적 판단에서 수치적/객관적 판단으로의 전환을 가능하게 한다. 또한, CFD는 선형의 국부적인 변형에 대해서도 유동해석이 가능하므로 선형과 성능과의 상관 관계를 규명하는데 보다 효율적인 도구로써 활용할 수 있다.

(2) **최적 설계의 자동화** : 수치화된 설계 기준과 파라메트릭 설계 방법은 최적화 기법으로 결합될 수 있으므로 설계자의 개

입없이 자동으로 주어진 설계 기준에 적합한 최적 선형을 도출할 수 있으며, 이로 인해 많은 설계 시간을 줄일 수 있다.

(3) **설계안의 다각화** : 조파 저항, 압력 저항 혹은 반류 등의 수치화된 설계기준 설정에 따라 단일 혹은 다목적 설계가 가능하다.

(4) **적용 분야의 확장성** : 설계 기준이 저항 성능 뿐 만 아니라, 조종 및 운동 성능 분야로 확장 적용하여 최적 선형설계가 가능하다.

속도성능을 고려한 선형 설계는 일반적으로 다음의 두가지 단계로 수행될 수 있다. 첫 번째 단계는 조파저항을 고려한 중방향 체적 분포 즉 횡단면적 곡선 설계(Sectional areal curve design)이다. 이것은 전역적(Global) 선형 설계 단계이며, 설계 조건들로 주어지는 유체정역학적 특성들 즉, 배수량(Displacement), 부심위치(Longitudinal center of buoyancy, LCB) 등을 만족하면서 선수 조파저항 혹은 선수 파형이 최소가 되도록 기준선의 횡단면적 곡선 변환을 수행한다. 이때 횡단면적 곡선을 구성하는 각 횡단면 형상은 변화하지 않고 중방향으로의 위치 이동을 통해 횡단

Received 10 March 2016, revised 17 June 2016, accepted 18 August 2016

Corresponding author Hyun-Cheol Kim: +82-052-279-3103, hckim@uc.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

면적 곡선의 유체정역학적 특성을 만족하도록 설계한다. 특히, 중·고속선에 대해서는 횡단면적 곡선으로 표현되는 종방향 체적 분포는 선수 조파 저항 혹은 선수 파형의 전역적 특성에 중요한 영향을 주므로 최소의 조파저항 혹은 완만한 파형이 발생할 수 있도록 설계되어야 한다. 여기서 유체정역학적 특성은 횡단면적 곡선을 구성하는 형상 파라미터들로 표현될 수 있다. 이들 형상 파라미터들을 조정하여 체계적으로 선형을 변환하는 방법이 파라메트릭 선형 설계(Parametric hull form design)이며, Lackenby(1950) 이후 많은 체계적인 파라메트릭 선형 변환 연구들이 수행되었다(Creutz, 1977; Harries, 1998; Kim, 2004; Kim and Hwangbo, 2008; Son and Kim, 2008; Kim, 2013).

두 번째 단계는 국부적(Local) 선형 특성을 고려한 횡단면 곡선 설계(Section design)이다. 횡단면 곡선은 프로펠러 간극(Tip Clearance), 선미 변동압, 선저 압력 저하 등을 고려하여 국부적으로 변환될 수 있는데, 주로 형상 저항과 자항 성능(Propulsion performance) 관점에서 설계를 수행한다. 횡단면 곡선 설계 업무를 효율적·체계적으로 수행하기 위해 파라메트릭 설계 연구(Kim, 2004)들이 시도되어 왔지만, 실제 현장의 다양한 요구를 만족하는 파라메트릭 설계 모델 방법은 아직 제시되지 못하고 있는 실정이다.

한편, 상술한 선형 설계 단계 중 첫 번째 단계인 횡단면적 곡선 설계는 “CFD를 이용한 선형 설계” 이전에 기준선의 선형 변환(Lackenby, 1950; Kim, 2013)을 통해 수행된다. 이때 방형계수(Block coefficient, C_b)와 LCB와 같은 유체정역학적 특성들을 만족하기 위해서 종방향(선박의 길이방향)으로 횡단면들을 이동함으로써 횡단면적 곡선을 조정하게 된다. 그 결과 이들 횡단면들은 주변 경계 곡선들과 부합하지 않기 때문에 선형 변환 결과를 직접 CFD에 적용할 수가 없다. 따라서 변환된 횡단면들을 반영한 추가 선형 설계 작업이 수반되어야 하며, 경험이 많은 선형 설계자라 하더라도 여기에 다소 작업 시간이 소요된다. 여기서 만일 횡단면적 곡선 설계 시 저항의 특성을 동시에 고려할 수 있다면 선형 설계 작업의 효율성은 더욱 증가할 것이다. 이러한 취지로 본 논문은 기하학적 파형(Geometric wave profile, GWP)과 체적 균형 선형 변환 방법(Volumetric balanced variation of ship hull forms, VOB)(Kim, 2004; Kim, 2013)을 횡단면적 곡선 설계에 적용함으로써 유체정역학적 특성과 조파 저항의 전역적 특성을 동시에 고려할 수 있는 실용적 선형 설계 방법을 소개하였다. 그리고 기하학적 파형이 횡단면적 곡선의 정보만을 이용하기 때문에 선형 정보를 모두 이용하는 CFD보다는 상대적으로 정확도가 떨어지지만, 조파 저항의 전역적 특성이 유사하여 실용적으로 적용 가능함을 검토하였다.

2. 체적 균형 선형 변환 방법

파라메트릭 선형 설계 방법은 선형을 형상 파라미터들만으로 정의하므로 기준선이 있을 경우 뿐 만 아니라, 기준선이 없는 경우에도 파라미터값들을 수정하여 쉽게 선형생성 및 변환을 수행할 수 있으므로 설계 자유도(Design freedom)가 높으며

(Lackenby, 1950; Creutz, 1977), 평활화 기준(Fairness criteria)을 적용할 경우에는 선형의 퇴화가 자유로운 선형 변환이 가능하다(Harries, 1998; Kim, 2004; Kim, 2013). 초기 선형 생성 시 형상 파라미터들의 조합이 어려운 단점이 있지만, 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해 다양한 시도가 이루어져 왔다. 선종별 표준선에 대한 형상 파라미터 조합을 미리 설정해 이용하는 방법이 그 중의 하나이다(Kim and Hwangbo, 2008; Son and Kim, 2008). 체적 균형 선형 변환 방법은 Kim(2004)에 의해 소개된 파라메트릭 선형 변환 방법으로, B-spline 변환 곡선과 SQP 최적화 기법(Sequential quadratic programming, SQP)을 이용하여 곡선 퇴화가 발생하지 않는 범위 내에서 형상 파라미터들을 만족하도록 횡단면적 곡선(Sectional area curve, SAC)을 수정하는 파라메트릭 선형 변환 방법이다. VOB은 평활화 기준(Fairness criteria)을 최적화의 목적함수로 활용함으로써 형상 파라미터들의 불합리한 조합에 의한 곡선퇴화를 방지하면서 최적 횡단면적 곡선의 형상 파라미터 조합 정보를 설계자에게 제공할 수 있다는 장점을 가진다. 수학적 표현은 다음과 같이 설계변수 $\vec{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 를 찾는 최적화 문제로 정식화될 수 있다(Kim, 2004; Kim, 2013).

목적함수 : 평활화 기준

$$f = J^2(\vec{C}) = \int_a^b \vec{C}'' dt \quad (1)$$

부등호 경계조건 : 형상 파라미터

$$g_i(\vec{V}) \leq \epsilon, i = 1, \dots, m \quad (2)$$

설계변수 경계조건 : B-spline 변환 곡선으로 정의되는 조정점(Control points)(Rogers and Adams, 1990)

$$v_{ilow} \leq v_i \leq v_{ihigh}, i = 1, \dots, n \quad (3)$$

여기서 ϵ 는 허용오차, $ilow$ 는 하한값의 색인, $ihigh$ 는 상한값의 색인을 나타낸다. 식 (1)~(3)을 이용하여 B-spline 곡선으로 정의되는 변환함수에 의해 조정된다. Table 1은 횡단면적 곡선 설계에 사용되는 형상 파라미터들과 그 특성을 나타내고, Fig. 1은 B-spline 변환 곡선을 이용한 횡단면적 곡선 설계의 개념도를 보여준다. 일반적으로 횡단면적 곡선은 무차원화되면 주형계수 곡선(Prismatic coefficient curve, C_p -곡선)과 동일하며 $C_p = \text{Total volume}(\nabla) / (\text{Length between perpendiculars}(L_{bp}) \times \text{Midship section area}(A_m))$ 로 정의된다.

VOB는 다음과 같은 특성들을 가진다.

- 횡단면적 곡선을 형상 파라미터들만으로 정의하고 조정함으로써 설계자가 간편하고 체계적으로 횡단면적 곡선 설계가 가능하다.

- 형상 파라미터들은 독립적으로 혹은 상호 연동하여 곡선을 변화시킬 수 있으며, 설계 조건들에 따라 설계자의 의도대로 조정이 가능하다. 기존의 방법들은 형상 파라미터들이 항상 상호 연동되어 변화되므로 선형 변환을 체계적으로 수행하는데 한계

Table 1 Form parameters for the parametric SAC design

PMB_a, PMB_f	Parallel middle body (PMB) length in aft and fore part
\bar{x}	Distance from midship to the SAC's centroid = Longitudinal center of buoyancy(LCB) / Lbp
\bar{z}	Vertical distance of the SAC's centroid = Vertical center of SAC(VCB)/Maximal area amidships (A_{max})
C_b	Block coefficient
C_p	Prismatic coefficient
x_a, z_a	Fixed position of SAC in the afterbody
x_f, z_f	Fixed position of SAC in forebody
x_b, z_b	Position at AP(After perpendicular)
x_e, z_e	Position at FP(Fore perpendicular)
α_b, α_e	Slope at AP and FP
α_{tb}, α_{te}	Slope at the parallel middle of the after- and forebody
$\delta-$	Required change value

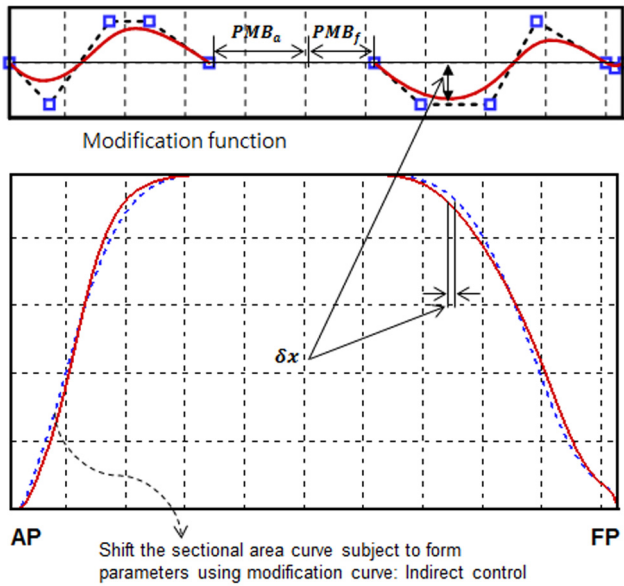


Fig. 1 Concept of parametric SAC design using B-spline modification curves

를 가진다.

- 형상 파라미터들의 변화량을 주어진 오차 범위 내에서 정확하게 변화시킬 수 있다.
- 평활화 기준을 적용함으로써 형상 파라미터들의 조합으로 발생 가능한 곡선평화를 방지하고 유용한 범위 내에서 횡단면적 곡선 변화가 가능하다.
- 횡단면적 곡선이 형상 파라미터들만으로 정의되어 상대적으로 조정할 설계 변수의 개수가 작으므로 CFD 해석과 결합된 최적화 기법의 확장 적용이 용이하다.
- 곡선 퇴화가 되지 않는 범위 내에서 유용한 형상 파라미터 변화량을 설계자에게 제공함으로써 가장 효율적이며 일반적인 선형 변환 수행이 가능하다.

3. 기하학적 파형

3.1 기하학적 파형의 수학적 정의

횡축은 선박의 길이를, 종축은 수선면 아래 횡단면적 값을 무차원화하여 나타낸 곡선을 주형계수 곡선(Prismatic coefficient curve, C_p -곡선)이라 하며, 포테셜 이론으로부터 유도되는 C_p -곡선의 2차 도함수값을 나타내는 곡선은 선측 파형(Wave profile)에 대응되는 것으로 알려져 있다(Mori, 1997). 앞서 설명한 바와 같이 선형 설계는 일반적으로 파형에 유리한 길이 방향 횡단면적 분포를 먼저 결정하는 다음 횡단면(혹은 늑골선) 형상을 설계하는 순서를 따른다. 이때 길이 방향 횡단면적 분포는 C_p -곡선 분석을 통해 결정되며 이 곡선 분석에 2차 도함수가 사용될 수 있다. 기존의 2차 도함수 분석은 모든 점들을 스플라인(Spline)으로 보간한 후 필터링(Filtering)하는 기법으로 만들어 졌다. 이러한 방법은 동일한 C_p -곡선일지라도 곡선을 구성하는 점의 개수, 곡선의 순정도 등에 따라 2차도 함수의 모습이 달라진다. 본 연구에서 소개하는 C_p -곡선 분석 방법은 급수(Series) 전개를 이용하여 적절한 차수(Order)의 삼각급수로 근사시킨 다음 이를 미분하는 방법으로, 필터링 또는 곡선의 평활화(Smoothing) 과정이 불필요하다.

급수 전개를 이용한 C_p -곡선 분석 과정은 다음과 같다.

- (1) 주어진 선형의 설계 홀수에서 길이 방향의 횡단면적 값을 구한다. 이와 같은 횡단면적 값을 최대 면적을 사용하여 무차원화하고 최대 횡단면 지점에서 선수부(Entrance)와 선미부(Run)를 분리하여 각각에 대해 분석한다. 단, 중앙 평행부(Parallel middle body)는 배제한다.
- (2) 선미부와 선수부의 길이(x 좌표)를 선폭(Breadth)으로 무차원화한다. 선수부는 유체가 흘러가는 방향으로 좌표를 잡는 반면 선미는 이와 반대 방향으로 잡는다. 각부에 대해 대칭이 되는 곡선을 추가하여 한 주기의 곡선을 만든다.
- (3) 푸리에 급수(Fourier series) 전개를 수행하여 적절한 차수에 해당하는 계수 값을 구한다. 여기서 적절한 차수(Degree)는

선형의 종류에 경험적으로 결정하였으며, 컨테이너선과 LNG 운반선은 6차, 저속 비대선은 12차로 근사시킨다. 이외의 선종에 대해서는 C_p -곡선 형상을 고려하여 사용자 경험에 따라 그 값을 정의할 수도 있다. N 차 푸리에 급수 전개를 이용한 C_p -곡선 표현식은 아래와 같다.

$$\eta(\xi) = f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N \{a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)\} \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nt) dt$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(nt) dt$$

$$t = \frac{2\pi}{\xi_{ed} - \xi_{st}} (\xi - \xi_{st})$$

$$\xi = x/B$$

x : 선박의 길이 방향의 좌표

B : 선박의 폭

ξ_{st} : Entrance부 또는 Run부의 시작점

ξ_{ed} : Entrance부 또는 Run부의 끝점

(4) 푸리에 변환하여 근사식을 구하면 이를 미분하여 1차 및 2차 도함수 곡선을 쉽게 구할 수 있다. 여기서 삼각 급수는 여러 번 미분을 수행해도 평활한 곡선을 얻을 수 있으므로 파형의 형상으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{2\pi}{\xi_{ed} - \xi_{st}} \frac{df}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{df}{dt} = - \sum_{n=1}^N \{na_n \sin(nt) - nb_n \cos(nt)\}$$

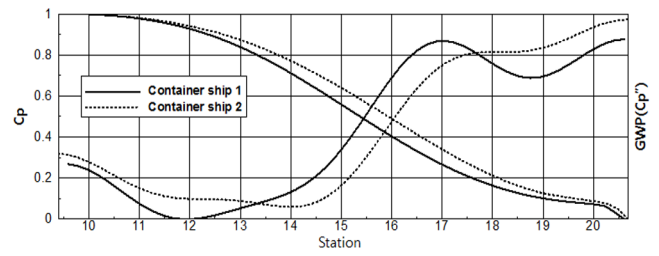
$$\frac{d^2\eta}{d\xi^2} = \left(\frac{2\pi}{\xi_{ed} - \xi_{st}} \right)^2 \frac{d^2f}{dt^2}$$

$$\frac{d^2f}{dt^2} = - \sum_{n=1}^N \{n^2 a_n \cos(nt) + n^2 b_n \sin(nt)\}$$

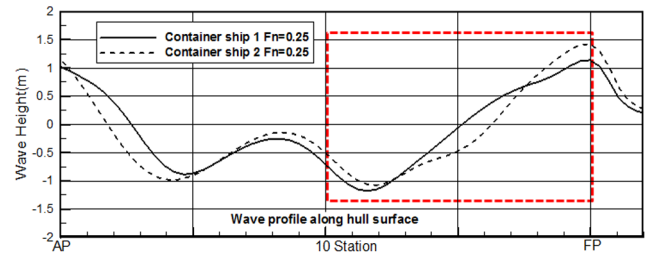
식 (5)의 2차 도함수의 값들을 길이 방향의 곡선으로 나타내면 선측 파형의 형상과 유사한 특성을 나타내며, 이를 본 연구에서는 기하학적 파형(Geometric wave profile)으로 정의하였다.

3.2 기하학적 파형의 특성

본 연구에서는 컨테이너선과 LNG 운반선에 대해 식(5)의 기하학적 파형을 적용하여 그 특성을 살펴보았다. Fig. 2는 2척의 다른 컨테이너선들에 대한 C_p -곡선 분석 결과와 CFD 결과를 비교한 것이다. Fig. 2(a)에서 선수부에 대한 기하학적 파형을 살펴보면, 13 Station과 14 Station사이 그리고 17 Station과 18 Station사이 파형의 교차점 위치와 정성적인 특성이 Fig. 2(b)의 CFD 결과와 약간의 차이는 있지만, 일부 유사한 경향을 나타낸다. 이러한 기하학적 파형 정보는 초기 선형 설계에서 전역적인 조파 저항 영향의 실시간 반영을 가능하게 한다.

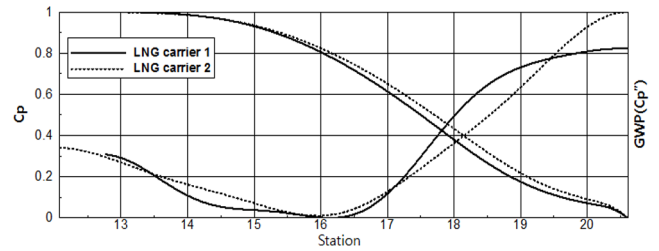


(a) C_p -curves and geometric wave profile

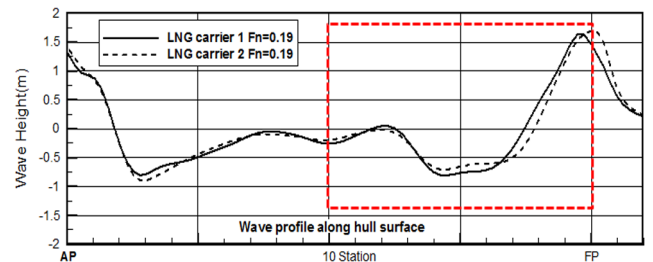


(b) Wave profiles by CFD

Fig. 2 Comparison of geometric and CFD wave profiles about container ships



(a) C_p -curves and geometric wave profile



(b) Wave profiles by CFD

Fig. 3 Comparison of geometric and CFD wave profiles about LNG carriers

Fig. 3은 2척의 LNG 운반선들에 대한 C_p -곡선 분석 결과들과 CFD 결과를 비교한 것이다. Fig. 3(a)의 선수부에 대한 기하학적 파형을 살펴보면, 13 Station에서 14 Station사이, 17 Station 부근, 19.5 Station부근에서 파형의 교차점 위치와 정성적 특성이 컨테이너선의 경우에서와 같이 Fig. 3(b)의 CFD 결과와 약간의 차이는 있지만, 일부 유사한 경향을 나타낸다. 그런데도 기하학적 파형 곡선식(5)에는 속도에 대해 고려되어 있지 않기 때문에 설계 속도 이외에는 적용하기 어려울 수가 있다. 그럼에도

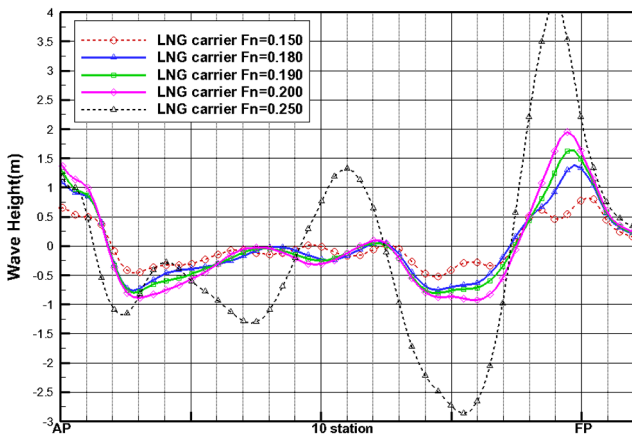


Fig. 4 Comparison of CFD wave profiles about LNG carrier 1

불구하고 본 논문에서 제안하는 기하학적 파형은 다음의 이유로 초기 설계에 효율적으로 적용 가능할 것으로 판단된다. 첫째, 선박의 종류에 따라 일정한 C_b , C_p 값이 존재하듯이 설계 속도 주변의 파형 또한 유사한 특성을 가진다. 예를 들면, Fig. 4는 Fig. 3의 LNG 운반선 1의 다양한 속도에 대한 CFD 결과를 나타낸 것으로, 설계 속도($Fn=0.19$) 주변의 CFD 결과(실선)는 유사한 파형의 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 유조선과 컨테이너선의 기하학적 파형도 설계 속도 부근에서 유사한 특성을 가지며, 설계 속도 이외에는 차수의 조정이 필요하다.

둘째, 식(5)에는 차수를 조정하여 다른 속도영역에 대해 파형의 특성을 부분적으로 정의할 수 있다. 그러나 적절한 차수 선정은 CFD와 모형시험 결과를 참조하여 결정하여야 한다. 셋째, 초기 선형 설계에서 기준선을 변환하여 유체 정역학적 특성(Hydrostatic property)들을 결정하는데, 기존에는 파형의 특성을 전혀 고려하지 못했지만, 기하학적 파형은 조파저항의 전역적 특성을 고려한 유체정역학적 특성 파악을 가능하게 한다.

4. VOB를 이용한 횡단면적 곡선 변환 예와 기하학적 파형 분석

4.1 VOB과 기하학적 파형 분석을 이용한 선형 설계 과정

현재 선형 설계 과정은 설계 조건이 주어지면 기준선 선형을 변환하여 유체 정역학적 특성을 만족하도록 초기 선형 설계를 수행한다. 이때 기준선의 기본 성능에 바탕을 두고 기하학적 선형 설계만 수행되며, 저항 및 추진 성능은 고려되지 않는다. 일단 이러한 과정에서 초기 선형이 결정되면 데이터 변환과 모델링 과정을 거친 후 CFD 계산을 통한 성능 분석을 하여 선형 설계에 반영한다. 반면, VOB과 기하학적 파형 분석을 이용한 선형 설계 과정은 Fig. 4에서와 같이 초기 선형 설계부터 기하학적 파형이 별도의 데이터 변환이나 모델링 과정 없이 동시에 계산되므로 실시간으로 매번 선형 설계 단계에서 기본적인 전역적 유체역학적 특성이 고려될 수 있다. 이것은 CFD 계산 전에 설계선에 대한 기본적인 유체 동역학적 성능 수준을 만족한다는 관점에서 큰 장점이라고 할 수 있다.

4.2 설계 적용 예

선수 형상은 주로 조파 저항의 영향을 많이 받으며, 선미 형상은 프로펠러와 연동되어 압력 저항과 추진 성능에 관계를 가진다. 특히, 초기 선형 설계에서는 주로 유체 정역학적 특성과 함께 조파 저항을 고려하여 전역적 설계가 수행되는데, 이는 선수에서 유발되는 조파 저항이 선미부의 압력 및 추진 성능에도 직·간접적으로 영향을 미치기 때문이다. 따라서 선형 단면의 국부 설계가 수행되기 전에 조파 저항에 기인하는 선수 형상 설계를 포함한 수면 하 배수량(혹은 부피) 분포의 최적화가 선행되어야 한다. 기하학적 파형 분석을 통한 VOB 선형 변환은 유체 정역학적 설계 조건과 조파 저항의 최적화를 초기 설계부터 고려하는 것을 가능하게 한다. 본 논문에서는 컨테이너선과 LNG 운반선에 대해 VOB 변환과 파형 분석을 적용하여 초기 선형 설계 실무에서의 적용성을 검토하였다. 여기서 C_b 와 LCB 와 같은 유체 정역학적 조건들을 만족하면서 선수 파형을 주로 분석하였다. 이는 선형 설계 실무에서 실제로 파형은 선수 형상과 유체 정역학적 조건을 만족하기 위해 초기 선형 설계에 반영되기 때문이다.

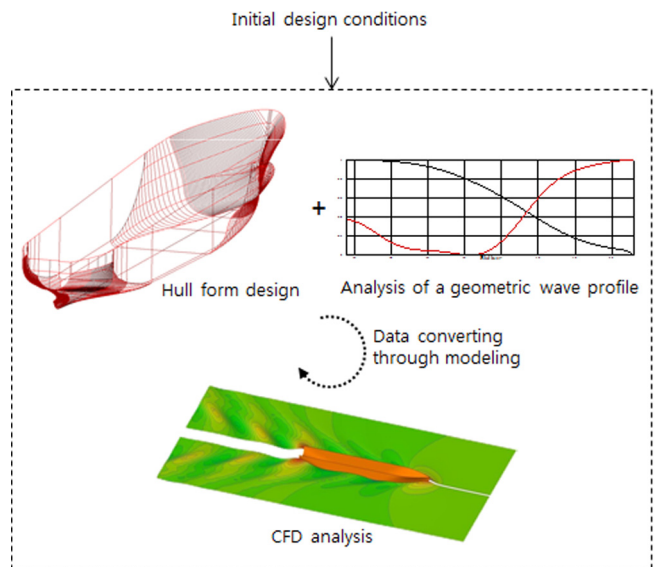


Fig. 5 Process of ship hull form design using VOB and geometric wave profile analysis

컨테이너선 적용 예

중양 평행부를 포함하지 않는 대상 컨테이너선은 $0.57 < C_b < 0.64$, $-2.3\% < LCB < -1.4\%$ 이며, 전역적 선형 설계 시나리오는 다음과 같다.

(a) C_b 는 고정, LCB 는 선수 방향 이동인 경우

Table 2는 배수량 변화가 없고 중방향 부심 위치만 선수 방향으로 변화시킬 경우의 SAC 변환 결과를 나타낸다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 Lackenby 방법은 주어진 설계 조건에서 SAC의 x 방향의 부심 위치(LCB)만 변환시킬 수 있지만, VOB은 y 방향의 부심위치(VCB)를 변화시킴으로써 기하학적 파형의

최적화를 시도할 수 있다. Fig. 6은 SAC변환 결과와 기하학적 파형 결과를 나타낸다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 LCB가 선수 방향으로 이동하게 되면 Lackenby방법은 A영역의 파정(Wave hump)과 B영역의 파골(Wave hallow) 사이의 경사가 기준선 대비 가파르게 나타난다. 그런데 VOB은 VCB를 조정하여 A영역의 파정과 B영역의 파골을 기준선 대비 작게 변환함으로써 상대적으로 경사가 완만한 파형을 보여준다. Lackenby방법은 VCB조정이 불가능하기 때문에 일반적으로 실무에서는 CFD계산을 수행한 뒤 국부적으로 선형 설계를 수행한다.

Table 2 SAC variation results of a container ship in case of $C_b = \text{constant}$, $LCB = \text{shifting}$

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	0.0	0.0	0.0
δLCB	m	1.0	0.997	1.0
δVCB	m ²	-1.0	-0.037	-0.996

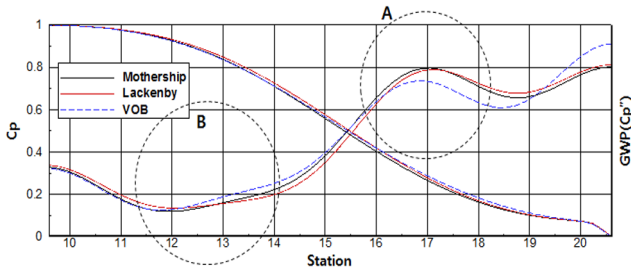


Fig. 6 SAC variation results and geometric wave profiles of a container ship in case of $C_b = \text{constant}$, $LCB = \text{shifting}$

(b) C_b 는 증가, LCB는 선미 방향 이동인 경우

Table 3은 배수량이 증가되고 중방향의 부심 위치를 선미 방향으로 이동시킨 경우 SAC 변환 결과를 나타낸다. 여기서 LCB가 선미 방향으로 이동하지만, C_b 가 증가하므로 선수부의 SAC형상도 기준선 대비 증가하는 양상을 보인다. 이것은 선수 어깨부분(Shoulder part)가 완만하게 되어 B영역의 파골을 작게하는 효과를 주지만, 선수 비대도 증가로 인해 A영역의 파정과 A의 간격을 작게하여 경사도를 급하게 하기도 한다. 이러한 결과는 Lackenby방법에 의해 잘 나타나고 있다. 그러나 VOB에 의한 VCB를 조정함으로써 기준선과 동일한 파정과 파고간의 경사도를 유지하면서 완만한 선수 어깨부 설계가 가능함을 Fig. 7은 보여주고 있다.

Table 3 SAC variation results of a container ship in case of $C_b = \text{increasing}$, $LCB = \text{shifting}$

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	0.02	0.019	0.020
δLCB	m	-0.10	-0.025	-0.100
δVCB	m ²	1.90	2.725	1.904

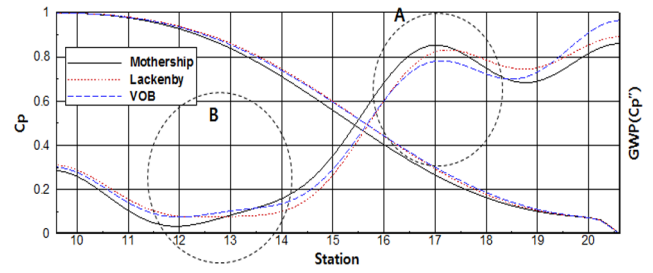


Fig. 7 SAC variation results and geometric wave profiles of a container ship in case of $C_b = \text{increasing}$, $LCB = \text{shifting}$

(c) C_b 는 감소, LCB는 선수 방향 이동인 경우

Table 4는 배수량이 감소되고 중방향의 부심 위치를 선수 방향으로 이동시킨 경우 SAC 변환 결과를 나타낸다. C_b 가 감소함으로써 SAC 선수 어깨부의 경사가 급하게 되어 B영역의 파골이 기준선 대비 깊어지게 되지만, 선수 부분이 날씬하게 되어 파정과 파저간의 경사가 상대적으로 완만하게 된다. 여기서 Lackenby방법은 C_b 감소 효과로 인해 파정과 파저간의 경사가 기준선대비 완만하지만 파정, 파고 각각의 크기는 더 크게 나타난다. 그러나 Fig. 8에서 VOB에 의한 결과는 VCB 조정을 통해 기준선보다 좋은 파형의 특성을 보여주고 있다. 또한, Lackenby방법이 주어진 파라미터 변화량에 대해 LCB와 VCB는 다소 다른 값을 나타내는데 반해 VOB방법에 의한 결과는 주어진 변화량에 정확한 결과 값을 보여주고 있다.

Table 4 SAC variation results of a container ship in case of $C_b = \text{decreasing}$, $LCB = \text{shifting}$

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	-0.02	-0.019	-0.020
δLCB	m	0.10	0.020	0.100
δVCB	m ²	-4.00	-2.914	-3.996

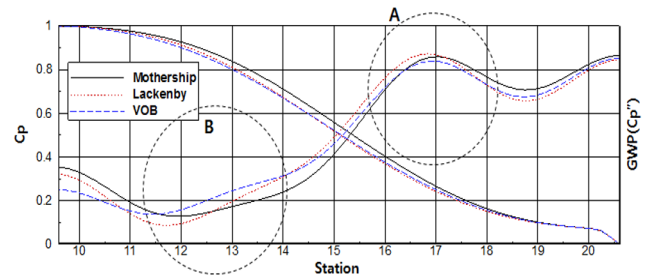


Fig. 8 SAC variation results and geometric wave profiles of a container ship in case of $C_b = \text{decreasing}$, $LCB = \text{shifting}$

LNG 운반선 적용 예

중양 평행부를 포함하는 대상 LNG 운반선은 $0.74 < C_b < 0.77$, $-0.34\% < LCB < -0.08\%$ 이며, 전역적 선형 설계 시나리오는 다음과 같다.

(a) C_b 는 고정, LCB 는 선수 방향 이동인 경우

Table 5는 배수량 변화가 없고 중방향 부심 위치만 선수 방향으로 변화시킬 경우의 SAC 변환 결과를 나타낸다. 주어진 입력 값에 대해 Lackenby와 VOB 모두 정확하게 SAC를 변환하는 것을 알 수 있다. VCB 조정은 Lackenby방법에는 없기 때문에 VOB만이 정확하게 입력된 변화량을 만족하도록 수행되었다. LNG 운반선은 컨테이너선에 비해 상대적으로 비대한 선형이므로 Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 파형은 A, B, C의 3가지 영역으로 나누어 분석할 수 있다. LCB 가 선수 방향으로 이동하였기 때문에 선수 부분의 비대도가 증가하여 A와 B부분의 파정, 파고의 경사도가 증가하게 되며, Lackenby방법에 의한 결과는 이러한 특성을 보여주고 있다. 그러나 VOB은 VCB조정을 통해 이러한 특성을 다소 완만하게 변화시킬 수 있음으로 보여준다.

Table 5 SAC variation results of a LNG carrier in case of C_b =constant, LCB =shifting

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	0.00	0.000	0.000
δLCB	m	1.00	0.998	1.000
δVCB	m ²	-0.10	0.041	-0.100

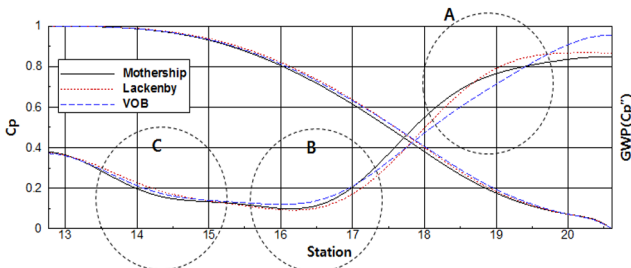


Fig. 9 SAC variation results and geometric wave profiles of a LNG carrier in case of C_b =constant, LCB =shifting

(b) C_b 는 증가, LCB 는 고정인 경우

Table 6은 배수량이 증가되고 중방향 부심 위치 변화가 없는 경우의 SAC 변환 결과를 나타낸다. Fig. 10에서 배수량만 증가되므로 A와 B영역의 파정, 파고간의 경사도가 증가하게 된다. Lackenby 결과는 부심 위치 변화가 없어서 B와 C영역의 파저 부분의 깊이가 기준선과 유사하게 되었지만, C_b 증가로 인해 A 영역의 파정과 파고의 경사도가 크게 나타났다. VOB결과는 A영역의 파정의 크기는 기준선 대비 크게 나타났지만 VCB조정으로 B와 C영역의 파저의 크기를 상대적으로 작게 가져감으로써 파정과 파고간의 경사도의 손실을 최소화하였음을 보여준다.

Table 6 SAC variation results of a LNG carrier in case of C_b =increasing, LCB =constant

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	0.01	0.010	0.010
δLCB	m	0.00	-0.004	0.000
δVCB	m ²	0.50	0.867	0.498

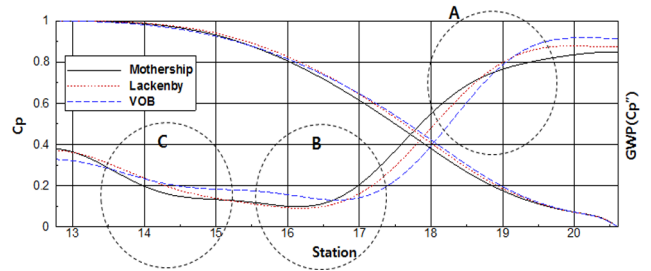


Fig. 10 SAC variation results and geometric wave profiles of a LNG carrier in case of C_b =increasing, LCB =constant

(c) C_b 는 감소, LCB 는 고정인 경우

Table 7은 배수량이 감소되고 중방향 부심 위치 변화가 없는 경우의 SAC 변환 결과를 나타낸다. Fig. 11에서 C_b 감소로 인해 A영역 파정의 높이가 기준선 대비 낮아진 것을 알 수 있다. 특히, VOB의 결과는 A, B, C영역의 파정의 연결이 가장 매끄럽게 나타나는 것을 보여준다.

Table 7 SAC variation results of a LNG carrier in case of C_b =decreasing, LCB =constant

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	-0.01	-0.010	-0.010
δLCB	m	0.00	0.005	0.000
δVCB	m ²	-0.40	-0.890	-0.400

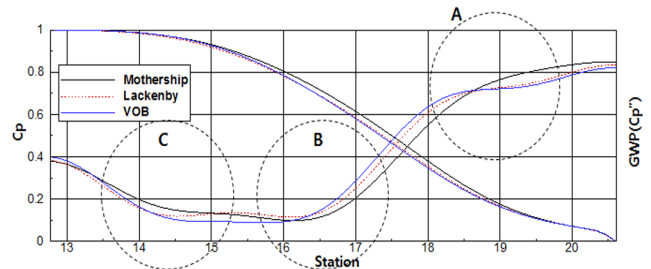


Fig. 11 SAC variation results and geometric wave profiles of a LNG carrier in case of C_b =decreasing, LCB =constant

(d) C_b 는 증가, LCB 는 고정, PMB_f 는 증가인 경우

Table 8은 배수량이 증가되고, 중방향 부심 위치 변화가 없고, 선수부 중앙평행부의 길이가 증가된 경우의 SAC 변환 결과를

Table 8 SAC variation results of a LNG carrier in case of C_b =increasing, LCB =constant, PMB_f =increasing

Symbol	Unit	Given value	Lackenby	VOB
δC_b	-	0.01	0.010	-0.010
δPMB_f	m	2.00	2.000	2.000
δLCB	m	0.00	-0.026	0.000
δVCB	m ²	0.50	1.004	0.500

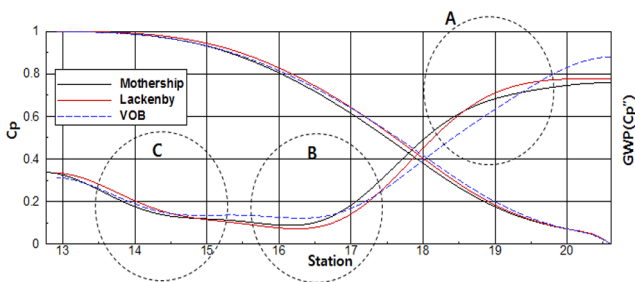


Fig. 12 SAC variation results and geometric wave profiles of a LNG carrier in case of C_b =increasing, LCB =constant, PMB_f =increasing

나타낸다. Fig. 12에서 Lackenby방법의 결과는 LCB 값이 주어진 입력 값에 비해 다소 차이를 보이지만, VOB의 결과는 설계 조건을 만족하도록 변환되는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 VOB는 VCB조정을 통해 가장 매끄럽게 파형을 형성하도록 SAC를 설계할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

일반적으로 선형 설계는 초기 선형 설계 후 CFD나 모형시험을 통해 저항 혹은 자항 성능을 분석하여 이를 선형 설계에 반영하는 시행 착오(Trial and error) 단계로 수행된다. 그러나 본 논문에서 소개한 체계 균형 선형변환방법(VOB)과 기하학적 파형을 연동한 선형 설계 방법은 선형 설계와 성능 분석이 동시에 이루어지는 실시간 설계가 가능하고 실용적으로 적용할 수 있음을 보여 주고 있다.

그 특성을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 설계 자유도가 높은 VOB을 이용하여 요구되는 설계 조건을 가능한 모두 반영하여 자유도가 높은 전역적 설계가 가능하다.

둘째, 선형 변환과 동시에 기하학적 파형 분석이 가능하므로 실시간으로 유체 정역학적 특성과 동시에 저항 성능의 정성적 특성을 파악할 수 있다. 초기 선형 설계 단계에서는 다양한 설계 조건들의 변경이 빈번히 발생하므로 이러한 저항 성능의 정성적 특성 분석은 설계자 판단에 중요하며 필요한 정보를 신속히 제공하게 된다.

셋째, CFD 평가가 모형 시험 이전에 수행되어 선형 설계에 반영됨으로써 설계 시간과 비용 절감에 많은 영향을 주었듯이, 기하학적 파형을 고려한 선형 설계는 CFD 이전에 수행됨으로써 보다 많은 설계 시수와 비용 절감을 가져올 것으로 판단된다. 더불어 더 효율적이고 신속한 설계 작업을 가능하게 할 것이다.

본 논문은 초기 설계 단계에서 성능의 정성적인 평가를 설계에 신속하게 반영함으로써 요구되는 다양한 설계 조건들에 보다 효율적으로 대응하는 것을 그 목적으로 하였다. 따라서 향후에는 정확한 성능 평가에 대한 연구와 함께 본 논문에서 소개한 방법처럼 정성적인 성능 평가를 통해 신속히 설계 결과를 제공할 수 있는 연구도 함께 후속으로 병행되어야 할 것으로 생각된다. 이것이 급변하는 선주 요구 조건과 짧은 설계 시간에

대응하는 강력한 경쟁력이 될 것으로 판단되기 때문이다.

후 기

본 연구는 2015년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Creutz, G., 1977. Curve and Surface Design from Form Parameters by Means of B-Splines. (in German), Ph.D. Thesis, Technical University Berlin.

Harries, S., 1998. Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms. Ph.D. Thesis, Technical University Berlin.

Kim, H.C., 2004. Parametric Design of Ship Hull Forms with a Complex Multiple Domain Surface Topology. Ph.D. Thesis, Technical University Berlin.

Kim, H.C., 2013. On the Volumetric Balanced Variation of Ship Forms. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(2), 1-7.

Kim, H.C., Hwangbo, S.M., 2008. Surface Modeling of Forebody's Hull Form Using Form Parameters and Fair-Skinning, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), 601-610.

Kim, H.J., Choi, H.J., Chun, H.H., 2007. A Practical Hull Form Optimization Method Using the Parametric Modification Function, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(5), 542-550.

Lackenby, H., 1950. On the Systematic Geometrical Variation of Ship Forms. *RINA Transactions*, 92, 289-309.

Lee, Y.S., Choi, Y.B., 2009. Hull Form Optimization Based on Form Parameter Design. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), 562-568.

Markov, N.E., Suzuki, K., 2001. Hull Form Optimization by Shift and Deformation of Ship Sections, *Journal of Ship Research*, 45(3), 197-204.

Mori, M., 1997. Hull Form Design. (in Japan), Japan Ship Technology Research Association.

Peri, D., Rossetti, M., Compagna, E.F., 2001. Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques. *Journal of Ship Research*, 45(2), 140-149.

Rogers, D.F., Adams, J.A., 1990. *Mathematical Elements for Computer Graphics*. 2nd Edition, McGraw-Hill Publishing Company.

Son, H.J., Kim, H.C., 2008. Remodeling of Hull Form and Calculation of Design Parameters using Cubic Composite Spline. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 13(6), 440-449.