공학석사 학위논문

주형 계수를 유지하는 선형의 물가름각과 물모음각 변환 방법

Entrance and Run Angles Variation Method of Hull Form Preserving the Prismatic Coefficient

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
손 은 영

주형 계수를 유지하는 선형의 물가름각과 물모음각 변환 방법

지 도 교 수 오 민 재

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2022년 2월

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
손 은 영

손은영의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 신 동 목 (인)

심사위원 오 민 재 (인)

심사위원 안 형 택 (인)

울산대학교 대학원

2022년 2월

주형 계수를 유지하는 선형의 물가름각과 물모음각 변환 방법

손 은영
울산대학교 대학원 조선 및 해양공학과

국문 요약

초기 선형 설계를 하기 위해 선형을 변환하는 방법에는 Offset 변환, Lines 변환, 선형 변수 변환 등 여러 방법이 있다. 일반적으로 2D lines를 이용한 선형 변환은 수작업으로 이루어지며, 설계자의 노하우에 따라 다른 결과를 얻는다. 본 연구에서는 선형을 변환할 수 있는 변수 중, 물가름각과 물모음각에 대하여 Free-Form Deformation 방법을 이용하여 변환하는 방법을 제안한다. Free-Form Deformation 방법은 형상을 변환하는 방법이다. Free-Form Deformation 방법을 이용한 변환은 변환되는 대상의 형상을 전체적으로 부드럽게 변환할 수 있다는 장점이 있기 때문에 사용자가 수작업으로 변형할 때의 국부적인 변환을 부드럽게 제어할 수 있다. 단, Free-Form Deformation 방법을 이용하여 선수와 선미의 물가름각과 물모음각을 변환하면 제약 조건인 주형 계수가 달라지게 된다. 따라서 변환하기 전과 같은 주형계수를 얻기 위해 물가름각과 물모음각을 유지하면서 국부적인 $1-C_P$ 변환으로 변환된 주형계수를 보정하는 방법을 제안하고 그 결과를 검증하였다. 본 연구에서 제안된 방법을 사용한다면 다양한 선형 데이터를 생성하는 시간이 단축되고, 생성된 선형 데이터와 그에 해당하는 해석 결과를 사용해 최적 선형 제안을 위한 머신러닝 모델 개발에 적용할 수 있다. 또한 선형의 해석 결과만이 아닌 최적 선형의 제안이 가능하여 선형 변환의 기술이 부족한 중소조선사의 설계 기술 경쟁력 강화에 도움이 될 것이다.

목차

그림 목차

그림 목차

표 목차

제1장 서론

1.1. 연구 배경

일반적으로 조선소에서의 선형 설계 프로세스는 Fig 1.1과 같다. 우선 각 조선소에서 보유하고 있는 Database로부터 선주의 요구사항(선종, 선속, 길이(Length, L), 폭(Breadth, B), 높이(Depth, D), 주형계수 등)에 가장 근접한 모선을 선택한다. 선택된 모선은 대부분 2D lines로 구성되어 있으며, 그 lines를 이용하여 설계선의 주요치수에 맞도록 변환하여 선형 설계를 수행한다.

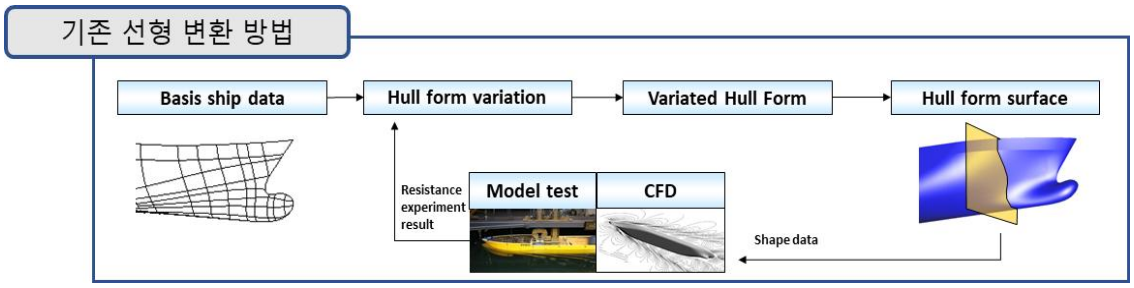


Fig 1.1 Hull form variation proceed

초기 선형 설계 단계에서는 좋은 성능의 선형을 설계하기 위하여 기준선으로부터 여러 가지 형상이 변환된 선형을 설계하고, 성능해석을 통하여 그 중에서 가장 성능이 우수한 선형을 선정한다. 해석 결과가 만족스럽지 않다면 선형 변환을 다시 수행한다. 이러한 선형 최적화 과정이 중요한 이유는 성능을 검증하기 위한 모형시험에도 값비싼 비용이 들고, 선박이 조립이 된 후에는 설계 수정이 불가능하기 때문이다. 기존 방법의 문제점은 선형 변환이 수작업으로 이루어지기 때문에 많은 시간이 소요되고 다양한 선형을 생성하기 어렵다는 것이다. 또한 주어진 조건(L, B, D, 주형계수(C_P))을 만족하는 최적 선형을 찾기 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수작업이 아닌 정확한 데이터로 계산하여 선형 변환을 수행한다면 최적 선형을 설계하기 용이하다.

한편 중소조선사에서는 선형을 설계해서 해석할 수 있는 기술이 부족하기 때문에 전문기관에 유체 해석을 의뢰한다. 일반적으로 이때 의뢰하는 선형이 최적선형이 아니며 최적선형을 개발하기 위한 선형 변환 기술 또한 부족하다. 또한 최근 인공지능 기술이 발전함에 따라 조선 분야에 다양하게 적용되고 있는데, 그중 한 분야로 유체해석 및 모형선 시험을 대체할 수 있는 머신러닝 개발이 있다. 이러한 머신러닝 모델을 개발하기 위해서는 많은 양의 선형 데이터와 해석 결과가 필요하다. 하지만 기존 선형 변환 방법의 문제점과 조선소의 도면 보안의 이유로 다양한 선형 데이터 확보가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 주형계수를 유지하며 물가름각과 물모음각을 변환하여 여러 가지 선형 데이터를 자동으로 생성하는 방법을 제시한다. 주형계수를 만족하며 물가름각과 물모음각을 자동으로 변환하여 다양한 선형을 생성한다면 선형 데이터를 생성하는 시간이 단축되고 변환된 선형의 신뢰도 또한 높을 것이다. 또한 생성된 선형 데이터와 그에 해당하는 해석 결과를 사용해 머신러닝 모델을 개발한다면 해석 시간을 단축할 수 있고 선형의 해석 결과만이 아닌 최적 선형의 제안이 가능하여 중소조선사의 설계 기술 경쟁력 강화에 도움이 될 것이다.

1.2. 연구 목적

초기 선형 설계 과정에서 여러 가지 다양한 선형을 유체해석과 모형선 시험을 수행한 후 그 결과를 비교하여 최적 선형을 판단한다. 이 과정에서 필요한 다양한 선형을 생성하기 위한 선형 변환 과정은 설계자의 노하우에 의해 수작업으로 생성되기 때문에 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 자동으로 선수와 선미를 변형하여 다양한 선형을 생성하는 알고리즘을 제안한다. 선수와 선미를 변형하기 위해 물가름각과 물모음각을 변수로 정의하고, Free-Form Deformation 방법[1]을 적용하여 국부적인 선형을 부드럽게 제어할 수 있다. Free-Form Deformation 방법을 적용하여 선형이 변환되면 배수량이 달라지므로 배수량의 유지를 위해 제약조건을 주형계수로 설정하였다. 그리고 변환하기 전과 같은 주형계수를 얻기 위하여 Local $1-C_P$ 변환 방법을 제시한다. 이러한 알고리즘을 통해 기준선의 전체적인 선형을 유지하며 부드러운 변환을 수행할 수 있고, 수작업으로 수행하던 선형 변환 작업을 자동화하여 여러 가지 선형을 빠른 시간에 생성할 수 있다.

1.3. 선행 연구 현황

저항을 최소화하여 선박의 효율을 높이려는 선형최적화를 위한 연구는 초기 선형 설계 단계에서 중요한 역할을 하고 있다. 선형을 설계하는 방법에는 전통적인 옵셋 기반 선형설계 방법과 선형 변수의 적용 범위에 따라 부분 파라메트릭 선형 설계 방법, 전 구간 파라메트릭 선형 설계 방법이 있다[3]. 부분 파라메트릭 선형 설계 방법은 주형계수(C_P)와 부심 위치(Longitudinal Center of Buoyancy, LCB), 중앙 평행부뿐만 아니라 선박의 저항에 큰 영향을 미치는 물가름각과 선수, 선미 측면도를 선형 계수로 사용해 선형을 설계하는 방법이다. 주형계수와 부심 위치를 계수로 하는 대표적인 방법에는 $1-C_P$ 방법[2], Lackenby 방법[4], swing 방법이 있다. 이 방법들은 공통적으로 횡단면적 곡선(Sectional Area Curve)의 횡단면 형상은 변화하지 않고 section을 종방향으로 이동시킨다. $1-C_P$ 방법과 Lackenby의 차이점은 $1-C_P$ 방법은 중앙 평행부의 크기를 사용자가 조절할 수 없고 Lackenby 방법은 중앙 평행부의 크기를 사용자가 조절할 수 있는 것이다. swing 방법은 횡단면 형상을 길이 방향으로 이동시켜 배수량은 보존하며 부심 위치를 조정한다. 이후 많은 체계적인 선형 변환 연구들이 이론적, 수치적 방법들로 개발되었다[5,6,7,8,9,10,11,12]. 이연승과 최영복[13]은 FOBFC(Fairness Optimized B-spline Form parameter Curve) 방법을 이용해 횡단면적 곡선을 변환하는 직접변환함수와 간접변환함수를 구분하고, 변환함수의 파라미터들로 선형 생성과 선형 최적화를 연구하였다. 김현철[14]은 횡단면적 곡선을 설계 가능하고 횡단면적 곡선퇴화를 방지하는 형상 파라미터들의 유용범위를 제시할 수 있는 체적 균형 선형변환방법(VOB)을 개발하여 선형 설계와 성능 분석을 동시에 수행해 자유도를 높인 전역 설계를 연구하였다. 박창규[15]는 기준 선형들 간의 선형 혼합에 의해 설계선의 선형을 얻는 기법인 선형 블랜딩 기법[16]으로 주요 치수 결정과 선형 변환 과정을 동시에 고려하는 연구를 하였다. 김태훈과 최희종은[17]선주들의 선박 대형화 요구를 하는 경우가 늘어남에 따라, 선박의 대형화를 위해 기존 선형의 LBP(Length Between Perpendicular)를 늘리게 된다. 이렇게 LBP가 변한 선형의 최적화 작업을 위해 $1-C_P$ 방법을 사용한 연구가 있다.

본 연구에서는 기존의 방법과는 다르게 FFD 방법으로 선형 옵셋을 변형하여 물모음각과 물가름각을 제어하고, $1-C_P$방법을 바탕으로 선형 전체뿐만 아니라 국부적으로 주형계수를 제어하는 새로운 방법을 제안한다.

제2장 배경 이론

2.1. Free-Form Deformation(FFD)

선형을 변형할 때, 주어진 기준선의 전체적인 형상을 유지하며 변환하기 위해서 본 연구에서는 T.Sederberg가 제안한 Free-Form Deformation 방법을 적용하였다 [1].

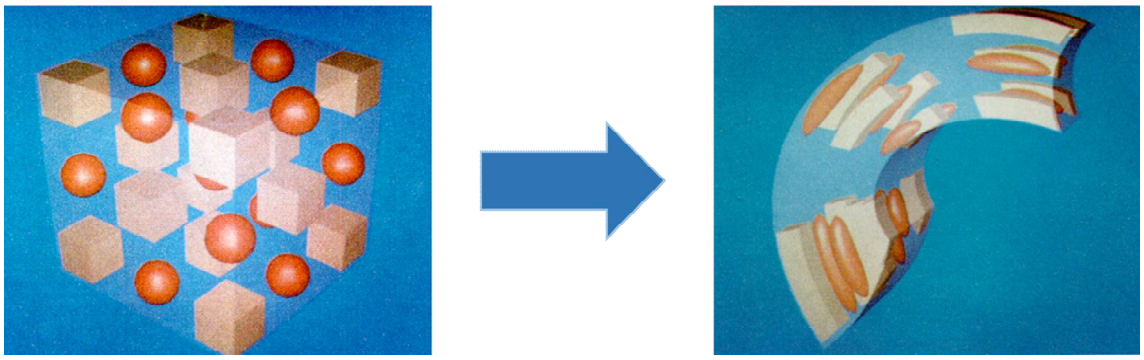


Fig 2.1 Original and variated Min-Max Box[1]

Free-Form Deformation 방법은 형상을 갖는 물체의 전체를 포함하는 Min-Max Box를 Fig 2.1과 같이 생성하고, 박스와 함께 구성된 객체들을 고려하여 함께 변형하는 것이다. 수학적으로 FFD 방법은 텐서 곱 삼변수 Bernstein 다항식의 관점에서 정의된다. Fig 2.1의 Min-Max Box의 영역에 국소 좌표계를 적용하여 Min- Max Box 내부의 어떠한 점 X가 식(1)과 같이 (s, t, u) 좌표를 가지고 있을 때, X의 (s, t, u) 좌표는 식(2)와 같이 계산하여 찾을 수 있다.

$$\mathrm{X} = \mathrm{X}_0 + s\mathrm{S} + t\mathrm{T} + u\mathrm{U} \tag{1}$$

$$s = \frac{\mathrm{T} \times \mathrm{U} \cdot (\mathrm{X} - \mathrm{X}_0)}{\mathrm{T} \times \mathrm{U} \cdot \mathrm{S}}, t = \frac{\mathrm{S} \times \mathrm{U} \cdot (\mathrm{X} - \mathrm{X}_0)}{\mathrm{S} \times \mathrm{U} \cdot \mathrm{T}}, u = \frac{\mathrm{S} \times \mathrm{T} \cdot (\mathrm{X} - \mathrm{X}_0)}{\mathrm{S} \times \mathrm{T} \cdot \mathrm{U}} \tag{2}$$

Min-Max Box 내부의 s, t, u 좌표 범위는 $0<s<1$, $0<t<1$, $0<u<1$이다.

다음으로 Min-Max Box 그리드에 조정점 P_{ijk}를 지정한다. Fig 2.2의 작은 하얀 점이 조정점(control point)을 나타낸다. 각각의 조정점은 식(3)과 같이 정의된다.

$$P_{ijk} = X_0 + \frac{i}{l}S + \frac{j}{m}T + \frac{k}{n}U \qquad (3)$$

Free-Form Deformation에서는 Min-Max Box 내부의 형상을 이 조정점을 이동시켜 변형시킨다. Min-Max Box를 원하는 형상으로 변형하였을 경우, 박스 내부의 변형된 점 X_{ffd}의 좌표는 식(2)에서 (s, t, u)의 좌표를 계산한 후, 식(4) 삼변수 Bernstein 다항식으로 구한다. 조정점 P_{ijk}는 Bernstein 다항식의 계수이다.

$$X_{ffd} = \sum_{i=0}^{l}\binom{l}{i}(1-s)^{l-i}s^{i}\left[\sum_{j=0}^{m}\binom{m}{j}(1-t)^{m-j}t^{j}\left[\sum_{k=0}^{n}\binom{n}{k}(1-u)^{n-k}u^{k}P_{ijk}\right]\right] \qquad (4)$$

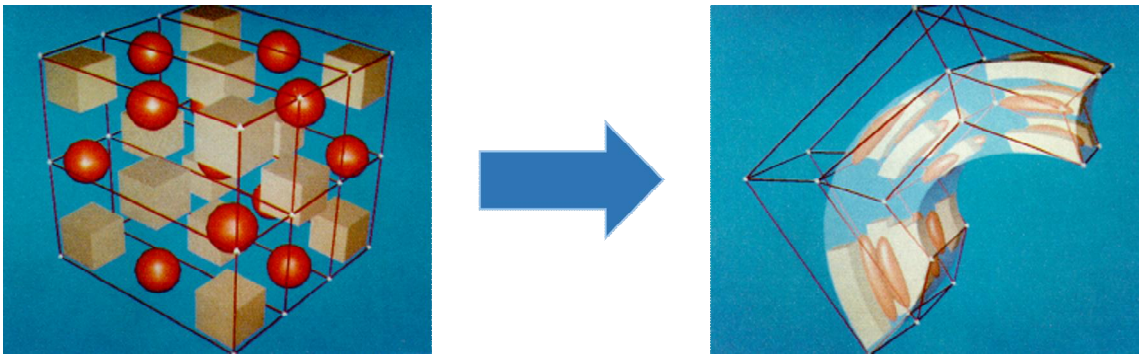


Fig 2.2 Original and variated Min-Max Box's control points[1]

2.2. C_P(주형계수)

C_P는 주형계수로 Fig 2.3과 식(5)에서 보여지는 것처럼 흘수에서 배수용적(▽)과 중앙 횡단면과 같은 단면에 선체의 길이(L)와 동일한 기둥의 부피에 대한 비율로 정의된다.

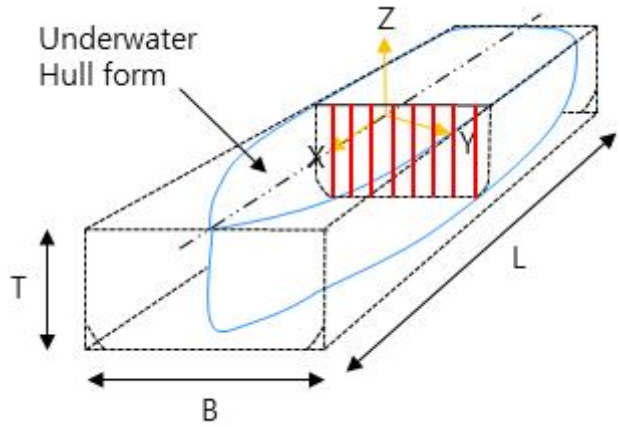


Fig 2.3 Prismatic coefficient

$$C_p = \frac{\nabla}{L \cdot A_M} \tag{5}$$

식(5)에서 A_M은 중앙 횡단면의 단면적이다. 같은 선형에서 중앙 횡단면의 면적에 선체의 길이를 갖는 기둥의 부피($L \cdot A_M$)는 직사각형 고체의 부피($L \cdot B \cdot T$)보다 작기 때문에 주형계수는 방형계수보다 크다. 이 계수는 선박의 길이에 따른 수중부피분포를 나타낸다. 만약 주형계수의 값이 작다면, 배수용적은 선체의 중앙에 집중되어 있고 주형계수의 값이 크다면, 배수용적은 종방향으로 균등하게 분포되어 있다. 주형계수는 선박의 저항 추진 성능과 많은 관계가 있으며, 선박의 속력과 동력의 계산에 주로 사용된다.

2.2.1 C_P variation

기준선에서 새로운 선형을 설계할 때, 새로운 C_P곡선에 맞게 section의 종방향 간격을 조정하여 배수량과 LCB(Longitudinal Center Buoyancy)를 보정하는 것이 일반적이다. C_P 변환 방법은 Fig 2.4와 같이 선박의 길이방향 section들의 종방향을 재배치함으로써 새로운 C_P곡선을 생성한다. 그림 2.6의 선박의 전체 길이(LBP)는 2로, 중앙 횡단면에서부터 ±1로 정규화되었다.

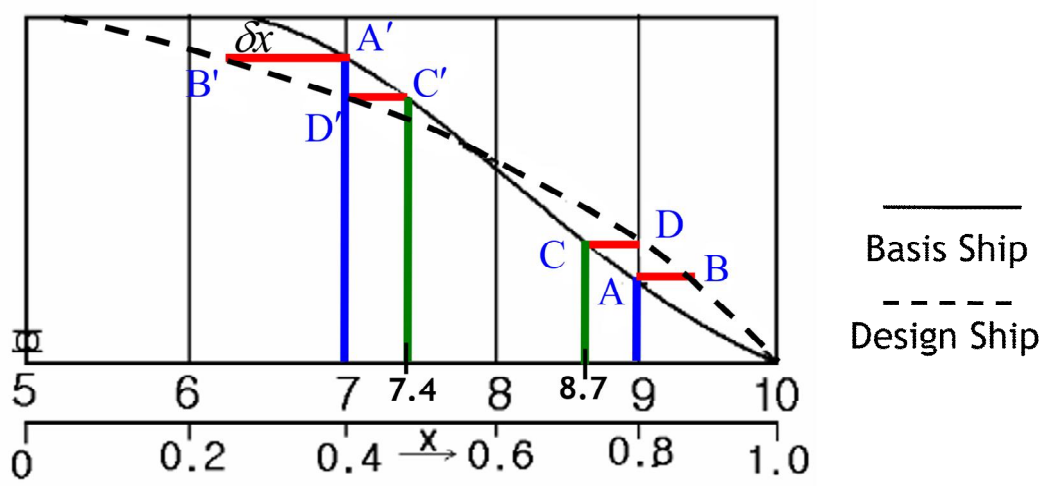


Fig 2.4 Generate new C_P curve for design ship[2]

C_P 변환에는 $1-C_P$ 변환방법[2], Lackenby 변환방법[4], Swing station방법이 있는데, $1-C_P$ 변환방법, Lackenby 변환방법은 선박의 배수량과 LCB를 변화시키고 swing station 방법은 배수량을 고정하고 LCB만 변화시킨다. 본 연구에서는 선박의 배수량을 변환하는 대표적인 방법인 $1-C_P$ 방법을 사용하였다.

$1-C_P$ 변환 방법은 기존 선형의 주형계수(C_P)와 LCB 그리고 주형계수의 변화량(δC_P)과 LCB의 변화량(δLCB)이 주어졌을 때, 변화량을 만족하는 설계 선형의 각 section 길이방향 이동량($\delta x_{f,a}$)을 얻을 수 있다. 이 방법에서는, Fig 2.5에서 보여진 것처럼 마지막 section에서부터 section들의 새로운 간격은 주형계수의 차이에 비례하여 식(6)으로 생성된다.

$$1-(x_{f,a}+\delta xf,a):1-x_{f,a}=1-(C_{Pf,a}+\delta C_{Pf,a}):1-C_{Pf,a} \qquad (6)$$

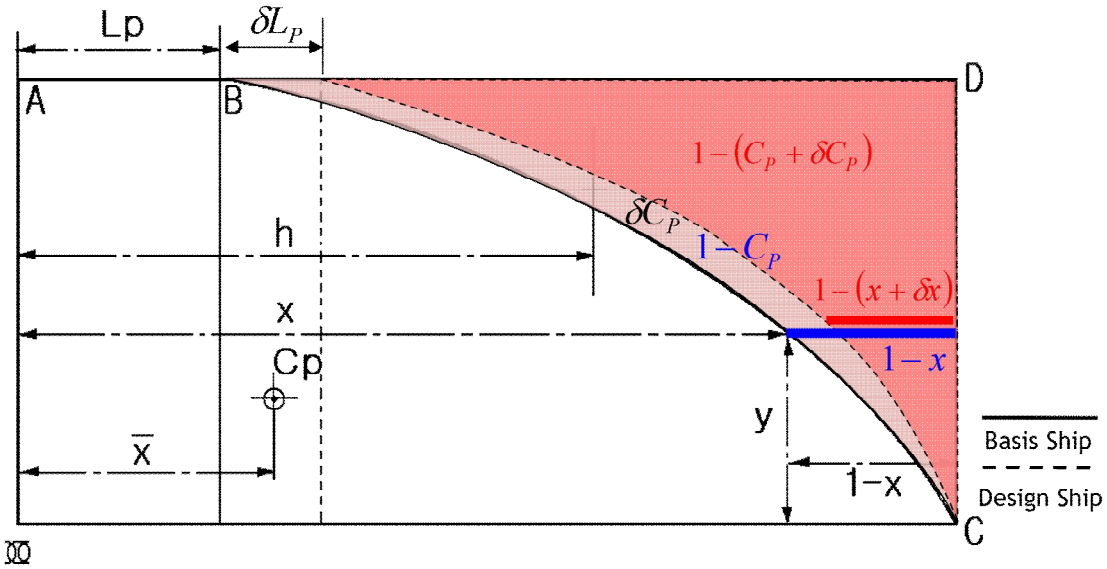


Fig 2.5 Definition of each section's longitudinal shift in $1-C_P$ variation[2]

$x_{f,a}$는 선수 또는 선미에서, 중앙 횡단면으로부터 어떠한 section까지의 길이이다. $L_{Pf,a}$는 선수 또는 선미에서, 중앙평행부의 길이이고, $\delta L_{Pf,a}$는 중앙평행부의 변화량이다. $h_{f,a}$는 중앙 횡단면으로부터 $\delta C_{Pf,a}$의 도심 길이이다. $\bar{x}$는 중앙 횡단면으로부터의 도심 길이이다. 식(6)에서 각 section의 종방향 이동량은 아래 식(7)에서 얻을 수 있다.

$$\delta x_{f,a} = \frac{\delta C_{Pf,a}}{1-C_{Pf,a}}(1-x_{f,a}) \tag{7}$$

C_P, δC_P, LCB, δLCB가 주어졌을 때, $\delta C_{Pf,a}$는 아래의 식(8)과 식(9)에서 얻을 수 있다.

$$\delta C_{Pf} = \frac{2\{\delta C_P(h_a+LCB)+\delta LCB(C_P+\delta C_P)\}}{h_f+h_a} \tag{8}$$

$$\delta C_{Pa} = \frac{2\{\delta C_P(h_f-LCB)-\delta LCB(C_P+\delta C_P)\}}{h_f+h_a} \tag{9}$$

$\delta C_{Pf,a}$를 계산하기 위한 h_f와 h_a는 식(10)에서 얻을 수 있다.

$$h_{f,a} \cong \frac{C_{Pf,a}(1-2\overline{x_{f,a}})}{1-C_{Pf,a}} \tag{10}$$

기준선에 Free-Form Deformation 방법을 적용하여 변환을 수행하였을 경우, 제약조건인 C_B, LCB ,C_{WP} 등을 만족하지 못하게 된다. 그 중 변환하기 전의 Volume을 보존하기 위해 본 연구에서는 $1-C_P$ 변환을 통해 보정한다.

제3장 주형계수를 보존하는 선형 변환 알고리즘

3.1. 전체 알고리즘 개념도

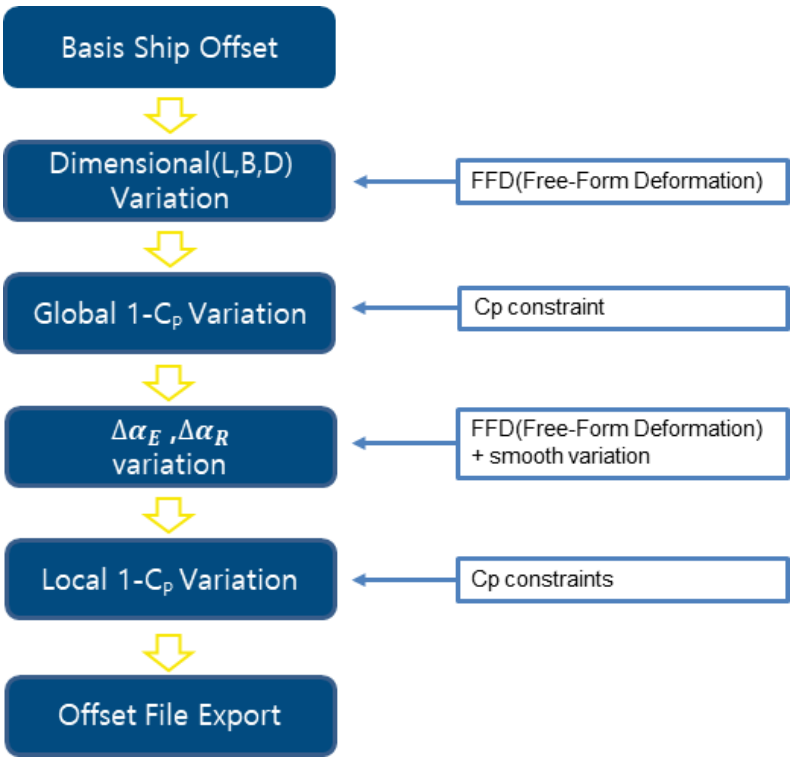


Fig 3.1 Flow chart of the proposed hull form variation method

Fig 3.1는 본 연구의 전체 알고리즘 개념도이다. 먼저 선형 데이터를 받아온 후, 전체 선형의 LBD 변환이 필요하다면 Free-Form Deformation 방법을 사용해 전체 선형을 Min-Max 박스로 감싸고 변형을 수행한다. 변형하기 전과 변형 한 후의 주형계수를 같게 해주기 위해 $1-C_P$ 변환 방법으로 배수량을 보정한다. 그 후 물가름각, 물모음각을 변환하기 위해 선수와 선미를 각각 Min-Max Box로 감싼 다음 변형시킨다. 변환전과 후의 주형계수를 보정하기 위해 Local $1-C_P$ 변환을 수행한다. 그 다음 변환된 선형 데이터를 내보낸다. 이 과정을 반복하여 물가름각과 물모음각의 각도는 다르지만 같은 주형계수 값을 가진 여러 개의 선형 데이터가 생성된다.

3.2. 선형 데이터 전처리

KVLCC2 선형 데이터를 불러온 후 각 옵셋의 x좌표, y좌표, z좌표를 모두 저장한 후 가시화를 하면 Fig 3.2와 같다.

Fig 3.2 KVLCC2 offset data

Fig 3.2에서 볼 수 있듯이 KVLCC2의 중앙평행부와 KCS의 중앙부는 section에 점이 하나밖에 주어지지 않는다. 이 구간은 station의 x좌표만 의미가 있는 값이고, section은 계산을 통해 알 수 있다. 계산은 주어진 데이터를 사용하여 (x,0,0) 점과 (x, Half Breath − Bilge Radius, 0) 점을 직선으로 잇는다. 그 후 (x, Half Breath − Bilge Radius, 0)부터 (x, Half Breath, Bilge Radius)를 잇는 1/4원호를 그린다. (x, Half Breath, Bilge Radius) 점과 (x, Half Breath, Depth) 점을 직선으로 잇는다. Fig 3.3은 계산의 이해를 돕기 위한 그림이다.

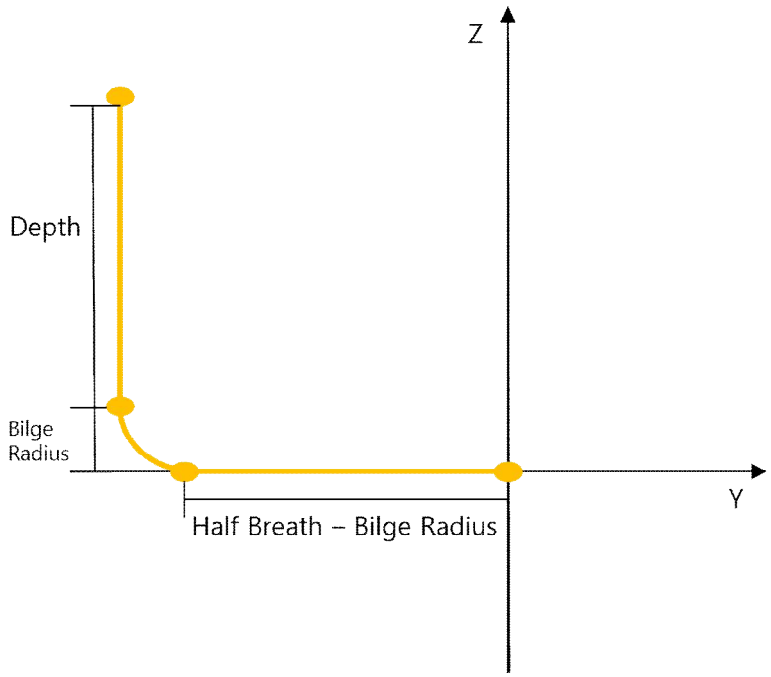


Fig 3.3 Generating midship section line

이러한 방법으로 점이 하나만 제공되는 section의 면적을 계산하여 주형계수를 계산하였다.

3.3 C_P 계산

본 절에서는 점 데이터로 주형계수를 계산하는 과정을 소개한다, 우선 점 데이터들을 구간 별로 x,y,z 좌표로 저장한다. 그 후 저장된 점들을 Cubic Interpolation을 통해 Fig 3.4와 같이 곡선으로 만들어 저장한다. 흘수에서 정확한 점이 없는 구간도 있기 때문에 Fig 3.5와 같이 흘수위치에서 z방향 평면을 만들어 Fig 3.4에서 만들어진 곡선과 만날 때의 y점을 구해 저장한다.

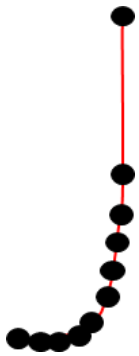


Fig 3.4 Make curve from offset data

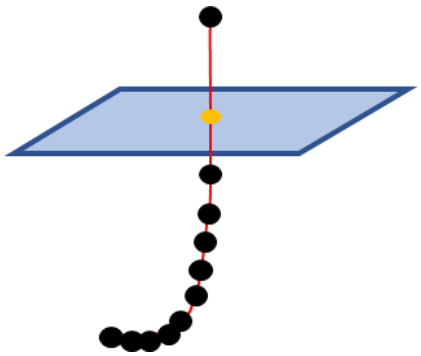


Fig 3.5 The offset where curve and plane meet

저장된 각 구간 흘수까지의 점들의 넓이를 사다리꼴로 나누어 계산하여 각 구간의 넓이 값을 x, 구간의 높이 값을 y로 하여 C_P곡선을 그린 후 각 구간의 넓이와 그에 해당하는 x좌표를 Fig 3.6과 같이 정규화하여 C_P곡선의 넓이를 전체박스의 넓이로 나누어 주형계수를 계산한다.

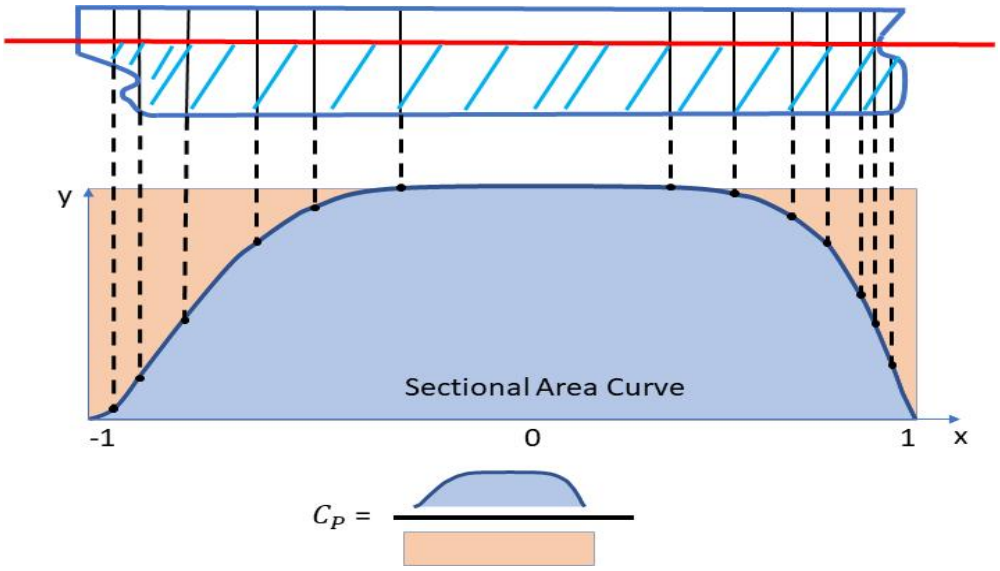


Fig 3.6 The method of calculating C_P

C_P곡선의 넓이는 Fig 3.7과 같이 곡선을 Simpson rule을 이용해 사다리꼴로 나누어 계산하였다.

Fig 3.7 The method of calculating Sectional Area Curve

3.4. Free-Form Deformation을 이용한 LBD 변환

기준선을 받아온 후 원하는 L,B,D를 만족하는 선형을 생성하기 위해 FFD 방법을 이용해 LBD 변환을 수행해야한다. FFD 방법은 물체 전체를 포함하는 Min-Max Box를 생성한 후 박스를 변형하여 내부의 물체를 부드럽게 변형하는 방법이다. 따라서 FFD 방법으로 선형을 변형하게 되면 선형의 형상이 변하지 않고 부드럽게 변형된다. FFD방법을 적용하기 위해서는 먼저 저장되어 있는 선형의 모든 옵셋을 불러온 후 Min-Max Box를 생성해야 한다. 각 옵셋의 x방향(길이방향), y방향(폭방향), z방향(높이방향)마다 가장 큰 좌표와 작은 좌표 값을 비교하여 그 값들로 Min-Max Box를 생성한다. 박스 안의 모든 옵셋들은 식(1)과 (2)을 통해 (s,t,u) 좌표 파라미터로 계산될 수 있다. 그 후 박스를 S,T,U방향으로 나눌 평면 갯수를 정한다. 본 연구에서는 FFD를 위한 Min-Max Box는 그림 3.6에서 볼 수 있듯이 S방향으로 3개, U방향으로 5개로 나누었다. S방향으로 3개를 나누어야 선형의 어깨부에 가까이 조정점이 걸리고, U방향으로 5개로 나누어야 흘수 위치에 조정점이 위치하기 때문이다. Min-Max Box를 나누는 개수는 사용자가 상황에 맞게 변경할 수 있다. 식(3)으로 박스의 조정점의 좌표를 계산한 후 원하는 선형을 얻기 위해 조정점의 위치를 변환한다. 변환된 조정점의 좌표와 식(4)를 이용해 변형된 선형의 옵셋들을 구할 수 있다.

Table 3.1은 기준선 KVLCC2 선형을 각각 길이 방향, 폭 방향, 높이 방향으로 변형률을 50% 적용하여 변형된 선형이고 Table 3.2는 기준선 KCS 선형을 각 길이 방

향, 폭 방향, 높이 방향으로 변형률을 50% 적용하여 변형된 선형이다. 따라서 FFD 방법을 통해 선박의 LBD 변환을 수행하여 원하는 L,B,D를 만족할 수 있다. 하지만 LBD 변환을 수행한 후에는 제약조건인 주형계수가 기준선과 달리지게 된다. 따라서 주형계수를 보정하기 위해 $1-C_P$ 변환을 수행하여야 한다.

Table 3.1 KVLCC2 applying LBD variation

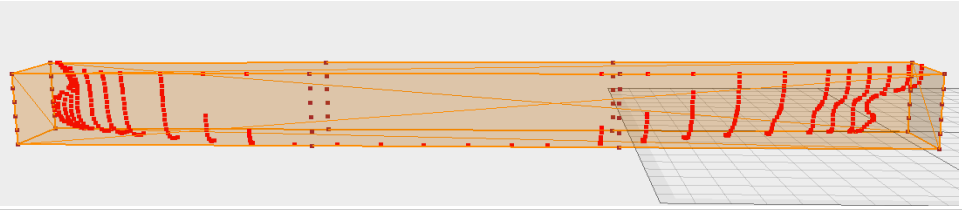
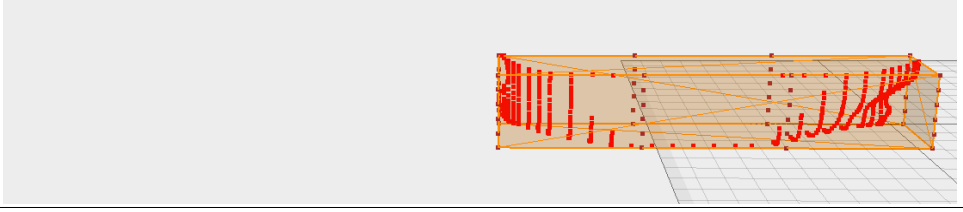
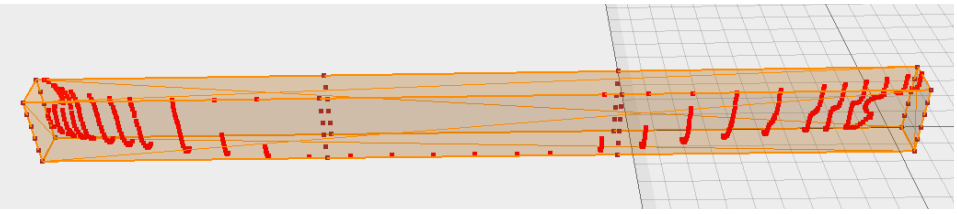
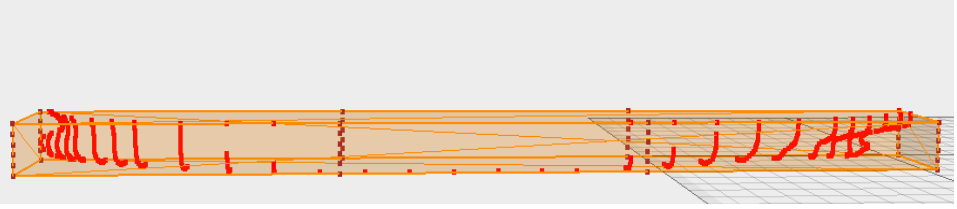
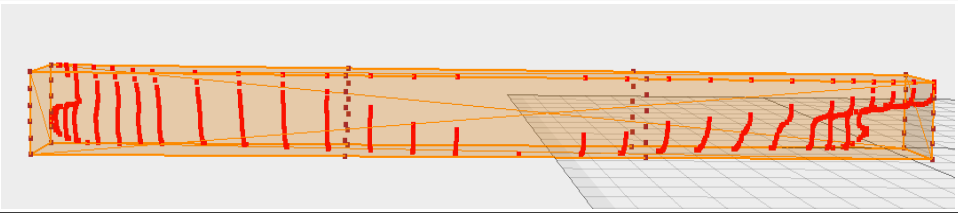
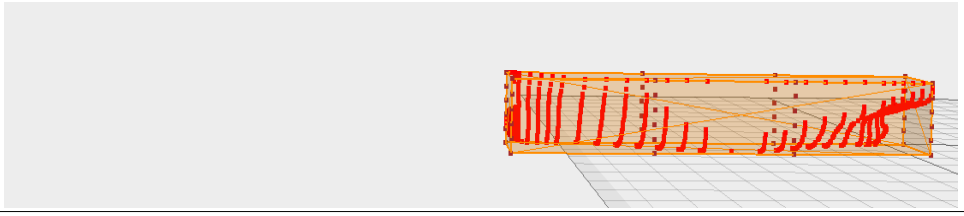
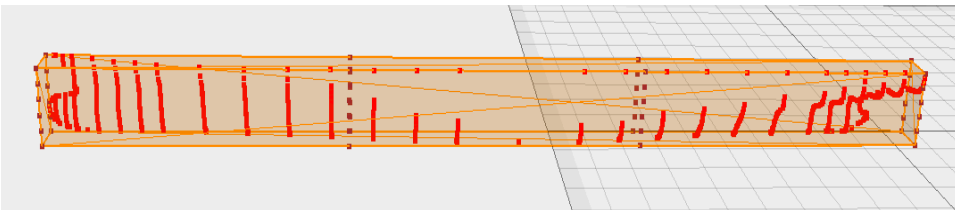
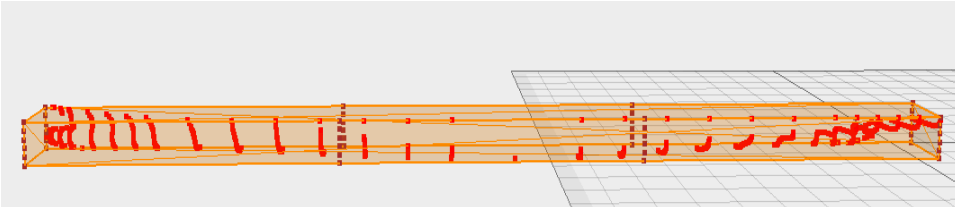
Original KVLCC2 offset

KVLCC2 applying x direction variation

KVLCC2 applying y direction variation

KVLCC2 applying z direction variation


Table 3.2 KCS applying LBD variation

Original KCS offset

KCS applying x direction variation

KCS applying y direction variation

KCS applying z direction variation


3.5 $1-C_P$ 보정

LBD 변환을 수행한 후 선형을 원하는 주형계수 값으로 보정하기 위해 $1-C_P$ 변환을 수행해야한다. 기준선의 주형계수에서 설계자가 원하는 주형계수를 뺀 값으로 δC_P 값을 계산한 후 선형의 흘수 아래 면적의 모멘트를 면적으로 나누어 LCB를 계산한다. 그 후 정규화된 C_P곡선에서 음수 구간의 면적으로 C_{Pa}를 계산하고 양수 구간의 면적으로 C_{Pf}를 계산한다. 계산된 $C_{Pf,a}$와 식 (10)으로 $h_{f,a}$를 계산한 후 식(8)과 식(9)로 δC_{Pf}와 δC_{Pa}를 계산한다. 이 계산된 값들로 각 section의 종방향 이동량인 $\delta x_{Pf,a}$를 식(7)을 사용해 계산한 후 각 section의 옵셋들에 더하여 주형계수를 만족하는 선형을 얻을 수 있다.

3.5.1 $1-C_P$ 보정 결과

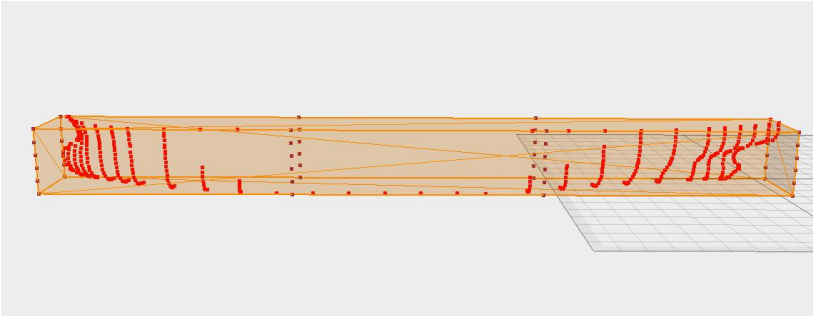


Fig 3.8 KVLCC2 applying 99.7% LBD variation

Fig 3.8은 KVLCC2 선형을 Min-Max Box로 감싼 후 폭 방향으로 99.7% 변형한 것이다. 변형하기 전 주형계수는 0.80882이고 변형 후 주형계수는 0.80745이다. δC_P의 값은 변형 전과 변형 후의 차로 0.001365이다.

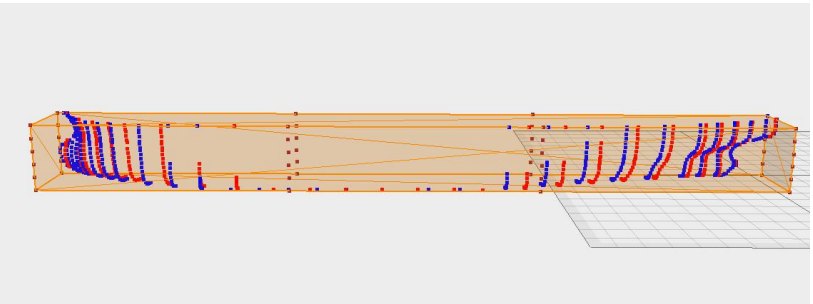


Fig 3.9 KVLCC2 after $1-C_P$ correction

Fig 3.9의 파란색 옵셋은 $1-C_P$ 보정을 통해 변형 후 주형계수를 0.80882로 보정한 선형이다.

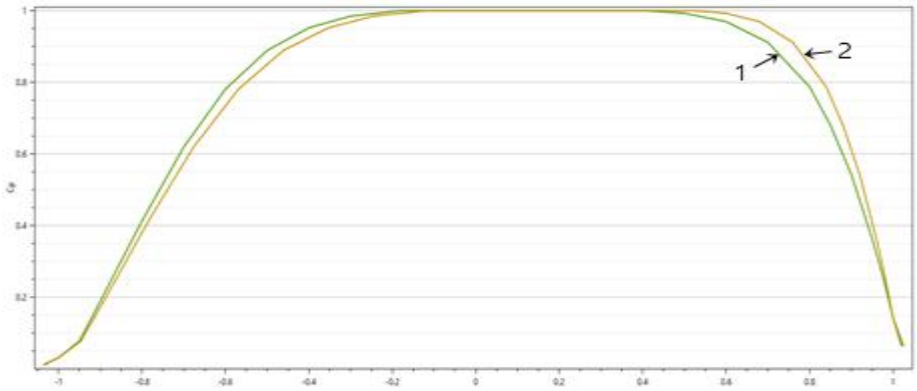


Fig 3.10 Comparison C_P curve before and after $1-C_P$ correction

Fig 3.10은 변형 전과 변형 후의 C_P곡선을 비교한 것이다. 1번 곡선이 보정 전 C_P 곡선, 2번 곡선은 보정 후의 C_P곡선이다.

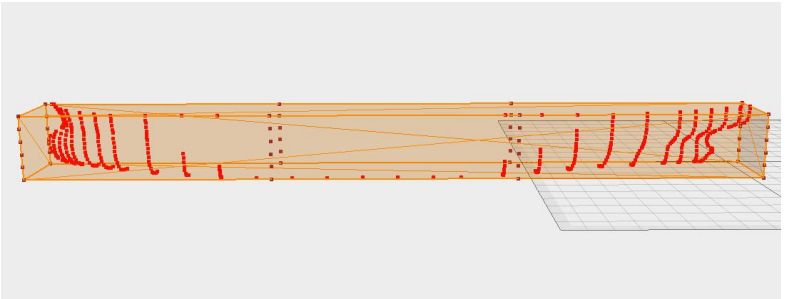


Fig 3.11 KVLCC2 applying 100.5% LBD variation

Fig 3.11은 KVLCC2 선형을 Min-Max Box로 감싼 후 폭 방향으로 100.5% 변형한 것이다. 변형하기 전 주형계수는 0.80882이고 변형 후 주형계수는 0.81024이다. δC_P의 값은 변형 전과 변형 후의 차로 −0.00142이다.

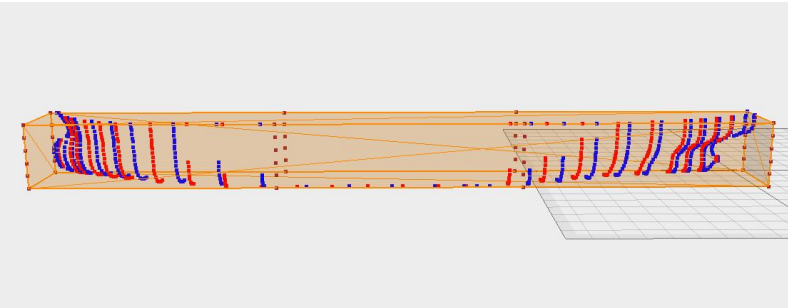


Fig 3.12 KVLCC2 after $1-C_P$ correction

Fig 3.12의 파란색 옵셋은 $1-C_P$ 보정을 통해 변형 후 C_P값을 0.80882로 보정한 선형이다.

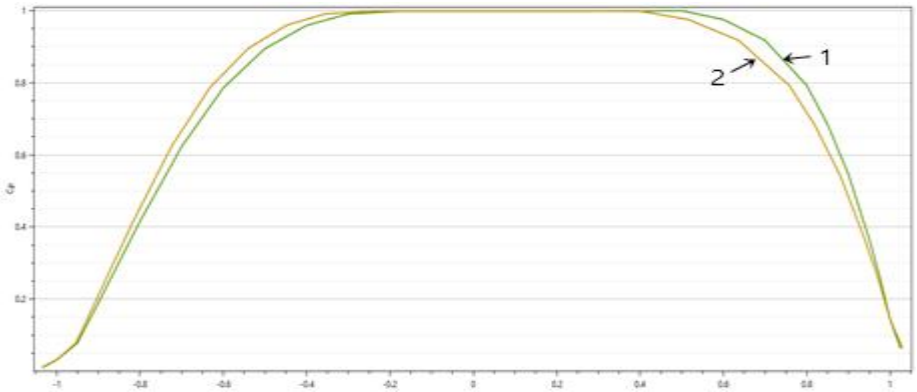


Fig 3.13 Comparison C_P curve before and after $1-C_P$ correction

Fig 3.13은 변형 전과 변형 후의 C_P곡선을 비교한 것이다. 1번 곡선이 보정 전 C_P 곡선, 2번 곡선은 보정 후의 C_P곡선이다.

결과의 그림들에서 볼 수 있듯이 KCS와 KVLCC2 두 선형이 LBD 변환을 수행한 기준선의 선형이 $1-C_P$ 보정을 통해 원하는 주형계수로 보정되었고 각 section들이 이동함을 알 수 있다.

3.6 물가름각, 물모음각 변환

기준선을 원하는 L,B,D와 주형계수로 만족시킨 후 다양한 선형 데이터를 얻기 위하여 물가름각과 물모음각을 변환시킨다. 물가름각은 물가름부의 수선의 접선이 선체 중심선과 이루는 각을 의미하고 물모음각은 물모음부의 수선의 접선이 선체 중심선과 이루는 각이다. 일반적으로 물가름각과 물모음각의 측정은 profile line에서 선체의 어깨부를 직선으로 이은 각도로 한다. 본 연구에서 사용한 KVLCC2 선박에서 profile line과 어깨부를 잇는다면 물가름부와 물모음부의 수선이 무시된다. 따라서 김유철[18]의 연구를 참고하여 Fig 3.14와 같이 흘수 위치에서 선수 profile line의 점과 19번째 station을 직선으로 이은 후 각도를 계산하였고, 물모음각은 흘수 위치에서 선미 profile line의 점과 3번째 station을 직선으로 이은 후 각도를 계산하였다.

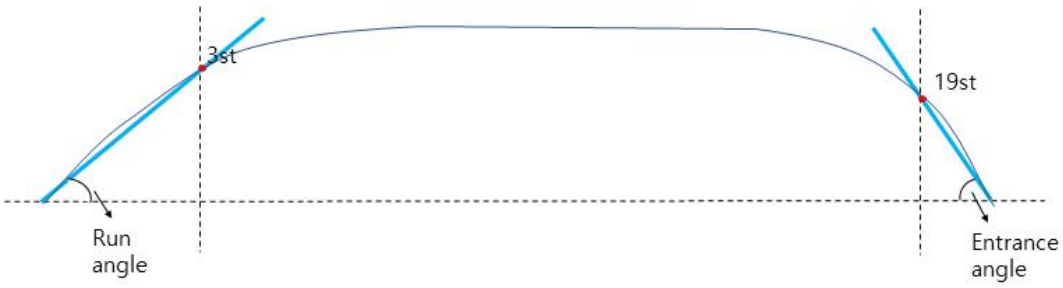


Fig 3.14 Run angle and entrance angle[18]

3.6.1 물가름각, 물모음각 변환을 위한 FFD 방법

물가름각과 물모음각의 국부적인 형상의 변환을 위해 FFD를 적용하였고, Min-Max Box는 X방향으로 3개, Z방향으로 5개로 나누었다. Fig 3.15와 같이 박스의 위에서 세 번째, 왼쪽에서 세 번째 조정점의 변형률을 100%로 적용하였고, offset의 부드러운 변환을 위해 그 아래 점은 변형률을 20%로 적용하였다. 변형되는 조정점의 선정 이유는 위에서 세 번째 위치가 흘수위치이고, 왼쪽에서 세 번째 조정점이 각도를 계산하기 위한 station의 위치이기 때문이다. Min-Max Box 조정점 개수와 변형률은 사용자가 변경할 수 있다.

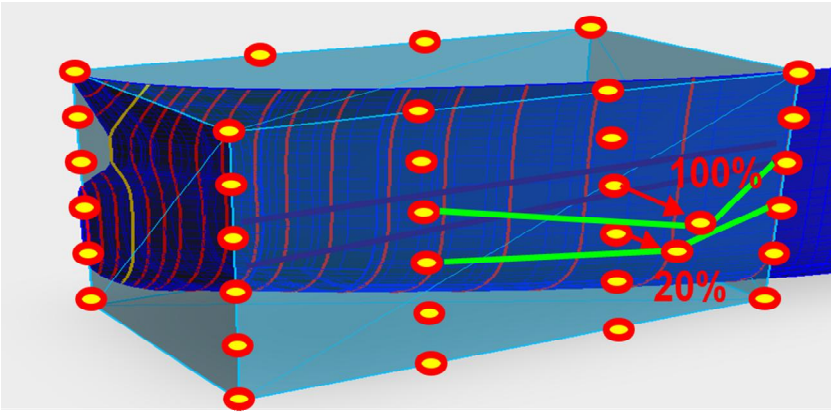


Fig 3.15 FFD method of entrance angle

기존의 FFD 방식은 Min-Max Box의 조정점을 움직인 후 2.1절의 식(4)로 Box 내부의 점 좌표를 계산하여 구한다. 본 연구에서는 조정점에 변형률을 적용하여 움직이는 기존의 방식과 각도를 변경하는 두 가지 방법을 사용한다. 각도를 변경하는 방식은 역으로 Box 내부의 물가름각과 물모음각을 계산하는 점의 좌표를 계산하여 구한 후 Min-Max Box의 조정점을 움직여야한다.

Fig 3.16에서 볼 수 있듯이 기존의 각도 θ와 변화한 각도 θ′을 통해 움직인 점의 좌표를 탄젠트로 계산할 수 있다. 이 때 박스 안에서 움직인 점과 기존 점의 파라미터는 같으므로 식(4)의 Y_{draft}에는 변형된 점의 절대좌표의 y 좌표 값을 대입한다. 그리고 우항의 s,t,u 파라미터에는 Fig 3.16의 기존 점의 파라미터를 대입하여 Min-Max Box의 조정점이 얼마나 움직였는지 계산할 수 있다. 움직이는 조정점은 Fig 3.15에 표시된 두 점인데, 두 점을 제외한 나머지 조정점들은 움직이지 않기 때문에 좌표의 변화가 없다. 각도를 변화할 때는 폭 방향으로만 변화를 준다. 따라서 조정점은 y 좌표에서만 움직이기 때문에 변화량을 δy로 두고 식(4)에서 움직이지 않는 점들의 합을 C로 정의한다.

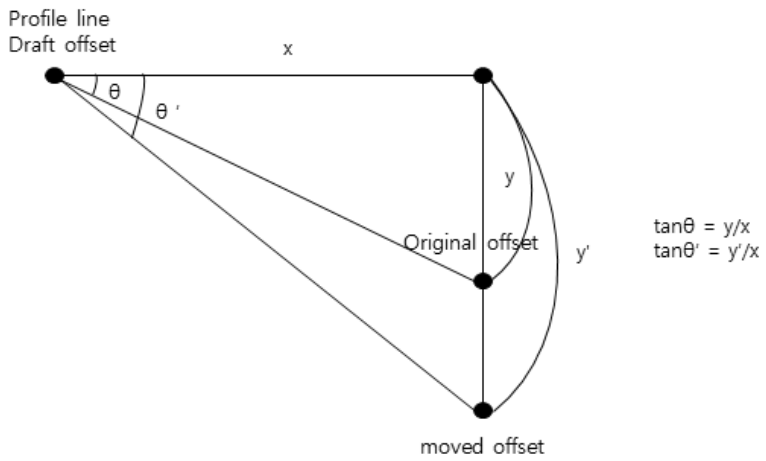


Fig 3.16 Calculation of the moved offset

또한 변형률이 100% 적용되는 조정점의 위치를 ijk라고 생각한다면 이동하는 조정점의 좌표는 $(P_{ijk}+\delta y)$, 변형률이 20% 적용되는 조정점은 100% 적용되는 점에서 z방향으로 한 칸 아래이기 때문에 $(P_{ij(k-1)}+0.2\delta y)$가 된다. 따라서 식(4)를 정리하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} Y_{draft} - C = & (1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-k}u^{k}(P_{ijk}+\delta y) \\ & +(1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-(k-1)}u^{(k-1)}(P_{ij(k-1)}+0.2\delta y) \end{aligned} \quad (11)$$

P_{ijk}와 $P_{ij(k-1)}$은 알고 있는 값이기 때문에 $(1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-k}u^{k}P_{ijk}$와 $(1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-(k-1)}u^{(k-1)}P_{ij(k-1)}$의 합을 P로 정의하여 식(11)을 정리하면 식(12)과 같다.

$$\begin{aligned} Y_{draft} - C - P = & (1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-k}u^{k}\delta y \\ & +(1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-(k-1)}u^{(k-1)}0.2\delta y \end{aligned} \quad (12)$$

δy를 계산하기 위해 식(12)를 다시 정리하면 식(13)과 같아진다. 식(13)에서 파라미터 s,t,u와 조정점의 갯수인 l,m,n과 변형률이 적용되는 점의 위치인 i,j,k는 모두 알고 있는 값이다. 따라서 식(13)의 우항에서 계산할 수 있는 값을 정리하여 $H = (1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-k}u^{k}+0.2(1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-(k-1)}u^{(k-1)}$로 정의하면 식(14)와 같이 δy의 값이 계산된다. 그 후 이동한 조정점의 좌표인 $(P_{ijk}+\delta y)$와 $(P_{ij(k-1)}+0.2\delta y)$을 구하여 식(4)를 계산한다면 박스 내부의 모든 점들이 이동한 좌표가 계산가능하다.

$$\mathrm{X_{ffd}} - \mathrm{C} - \mathrm{P} = \delta y((1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-k}u^{k} + 0.2(1-s)^{l-i}s^{i}(1-t)^{m-j}t^{j}(1-u)^{n-(k-1)}u^{(k-1)}) \tag{13}$$

$$\frac{\mathrm{X_{ffd}} - \mathrm{C} - \mathrm{P}}{\boldsymbol{H}} = \delta y \tag{14}$$

Fig 3.17은 선미부의 Min-Max Box를 늘렸을 때 변형된 선미 옵셋이다. 변환 전의 물모음각은 25.7도이고, 변환 후의 각도는 28.5도이다. Fig 3.18는 선수부의 Min-Max Box를 늘렸을 때 변형된 선수 옵셋이다. 변환 전의 물가름각은 55도이고, 변환 후의 각도는 58도이다. 두 그림에서 노란색 동그라미 안의 control point와 Min-Max Box 안의 선형이 부드럽게 변형된 것을 확인할 수 있다.

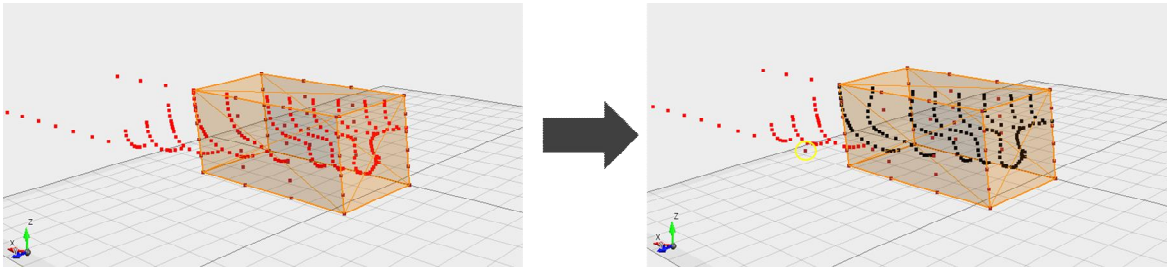


Fig 3.17 Run angle before and after applying FFD

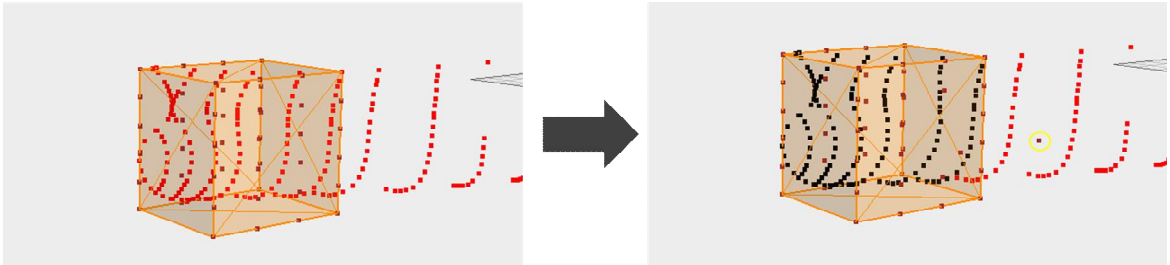


Fig 3.18 Entrance angle before and after applying FFD

하지만 각도를 변형한 후에는 보정해 놓았던 주형계수 값이 변하게 된다. 따라서 주형계수 값을 보정하기 위해, 기존의 $1-C_P$ 보정과는 다르게 원하는 형상으로 변형한 선수부와 선미부의 Min-Max Box의 section들은 제외한 나머지 section을 움직여 보정해야 한다.

3.7 Local $1-C_P$ 보정

본 연구에서 제안하는 방법으로 물모음각과 물가름각을 변환하면 주형계수 값의 변화가 발생하는데, 이때 원래의 주형계수 값을 유지하며 배수량을 보전해야 한다. 본 연구에서는 물모음각과 물가름각을 변환함에 따라 변환된 선수와 선미의 선형은 변환시키지 않으면서 선형의 나머지 부분에서 변환된 주형계수만큼의 값을 보전하는 Local $1-C_P$ 방법을 제안한다.

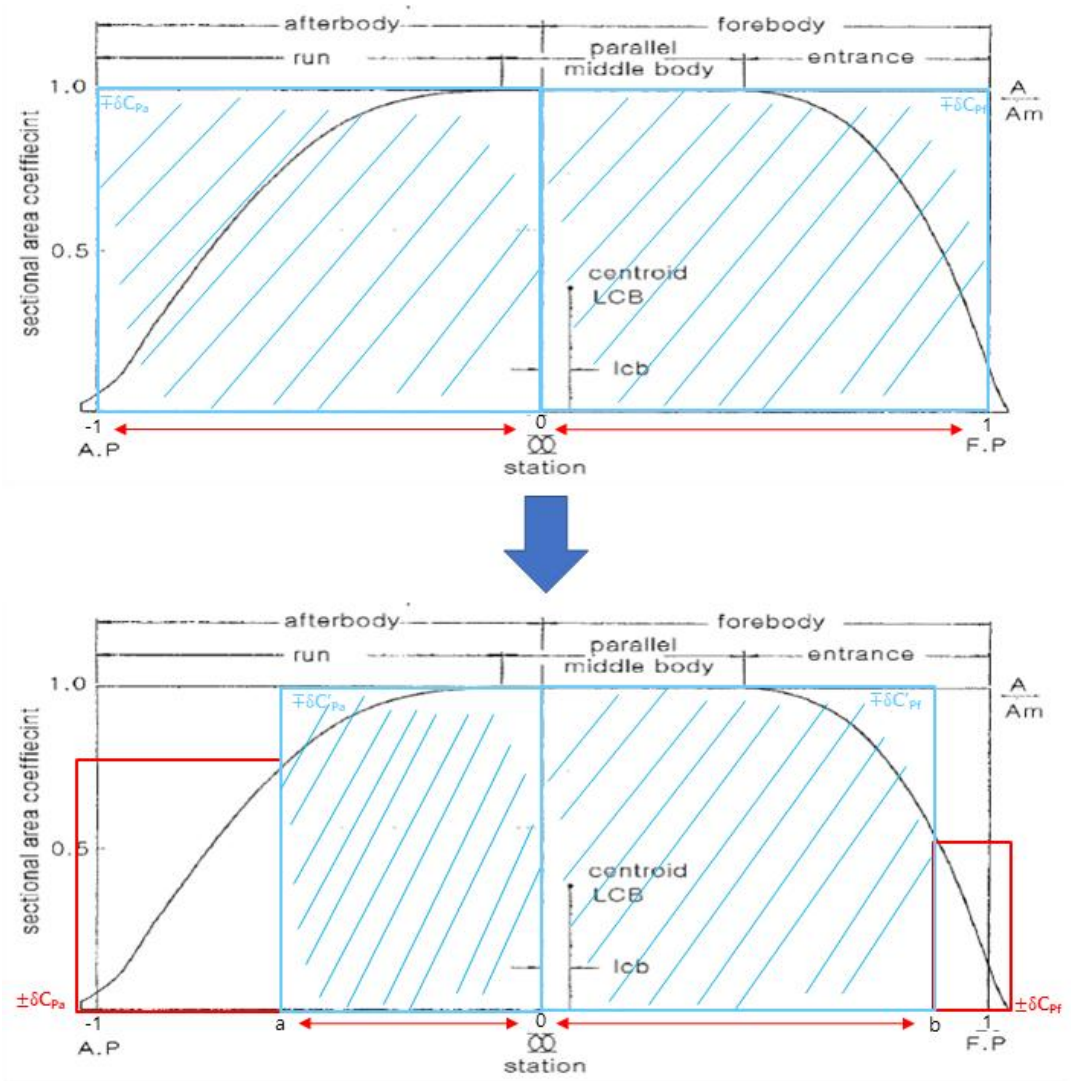


Fig 3.19 Original $1-C_P$ variation and local $1-C_P$ variation

Fig 3.19에서는 기존의 $1-C_P$ 방법과 Local $1-C_P$ 방법을 나타내었다. 기존의 $1-C_P$ 방법에서는 선미~중앙횡단면 구간과 중앙횡단면~선수 구간의 넓이를 각각 1로 정규화하여 그 넓이에서 각 구간의 주형계수 값을 뺀다. 하지만 Local $1-C_P$ 방법은 선수와 선미에서 Free-Form Deformation을 수행한 구간은 이미 원하는 형

상으로 변환하였기 때문에 제외하여 보정하여야 한다. Local $1-C_P$를 수행하는 구간의 넓이는 Fig 3.19에서 화살표 아래의 빗금 친 구간과 같다. 또한 물모음각과 물가름각의 변환 전 후 주형계수를 유지하려면 Fig 3.19과 같이 선수와 선미에서 변형된 주형계수의 값만큼을 선수와 선미를 제외한 구간에서 보정해야한다. 변형된 주형계수의 값(δC_P)은 식(15)과 같이 계산된다.

$$\delta C_P = \frac{\delta \nabla}{L_{BP} \cdot A_M} \tag{15}$$

Fig 3.19에서 빗금친 구간인 Min-Max Box들을 제외한 구간에서는 길이가 다르기 때문에 δC_P를 Local $1-C_P$에서 빗금 친 구간에 다시 적용해야한다. 식(16)으로 $\delta \nabla$을 구한 후 빗금 친 구간의 길이인 $L_{BP}{}'$로 식(17)과 같이 $\delta C_P{}'$을 계산 할 수 있다.

$$\delta \nabla = \delta C_P \cdot L_{BP} \cdot A_M \tag{16}$$

$$\delta C_P{}' = \frac{\delta \nabla}{L_{BP}{}' \cdot A_M} \tag{17}$$

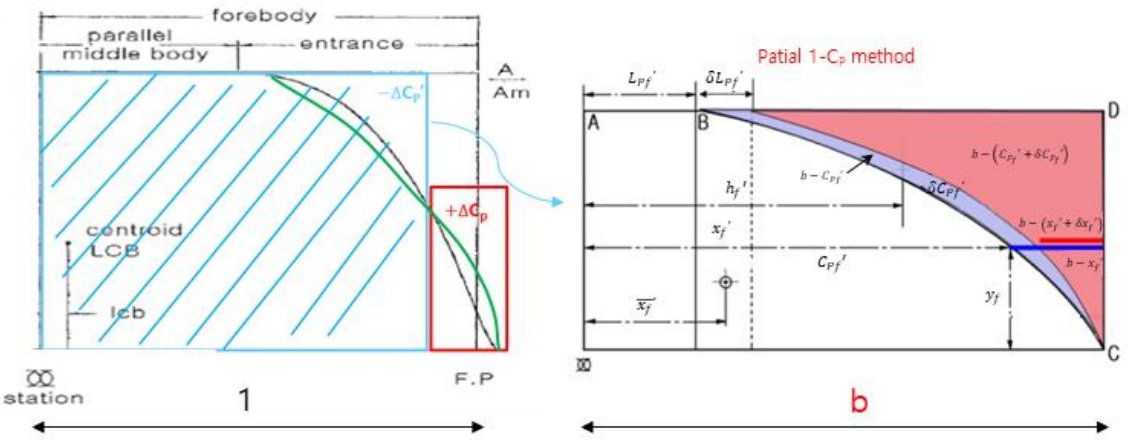


Fig 3.20 Local $1-C_P$ variation at forebody

Fig 3.20는 선수부에서의 Local $1-C_P$ 방법이 어떻게 적용되어 기존의 $1-C_P$ 방법과 다른지 나타내었다. 선미부에서의 Min-Max Box는 4번째 station까지 포함되어 있고 4번째 station의 위치좌표를 a라고 정의한다. 선수부에서의 Min-Max Box는 18.5번째 station까지 포함되어 있고 18.5번째 station의 위치를 정규화하면 b이다. 따라서 식(6)을 수정하면 선미부에서는 식(18), 선수부에서는 식(19)로 수정된다.

$$a-(x_a{}'+\delta x_a{}') : a-x_a{}' = a-(C_{Pa}{}'+\delta C_{Pa}{}') : a-C_{Pa}{}' \qquad (18)$$

$$b-(x_f{}'+\delta x_f{}') : b-x_f{}' = b-(C_{Pf}{}'+\delta C_{Pf}{}') : b-C_{Pf}{}' \qquad (19)$$

선미부에서의 각 section 종방향 이동량은 식(20)으로 계산하였고 선수부에서의 각 section 종방향 이동량은 식(21)으로 계산하였다.

$$\delta x_a{}' = \frac{\delta C_{Pa}{}'}{a-C_{Pa}{}'}(a-x_a{}') \qquad (20)$$

$$\delta x_f{}' = \frac{\delta C_{Pf}{}'}{b-C_{Pf}{}'}(b-x_f{}') \qquad (21)$$

C_P', $\delta C_P'$, LCB', $\delta LCB'$가 주어졌을 때, $\delta C_{Pf,a}'$는 아래의 식(22)과 식(23)에서 얻을 수 있다.

$$\delta C_{Pa}' = \frac{2\{\delta C_P'(h_a' + LCB') + \delta LCB'(C_P' + \delta C_P')\}}{h_f' + h_a'} \tag{22}$$

$$\delta C_{Pf}' = \frac{2\{\delta C_P'(h_a' + LCB') + \delta LCB'(C_P' + \delta C_P')\}}{h_f' + h_a'} \tag{23}$$

$\delta C_{Pf,a}'$를 계산하기 위한 h_a'는 식(24)에서, h_f'는 식(25)에서 얻을 수 있다.

$$h_a' \cong \frac{C_{Pa}'(a - 2\overline{x_a'})}{a - C_{Pa}'} \tag{24}$$

$$h_f' \cong \frac{C_{Pf}'(b - 2\overline{x_f'})}{b - C_{Pf}'} \tag{25}$$

3.7.1 Local $1-C_P$ 보정 후 결과

Fig 3.21에서는 선수부와 선미부에 변형률을 105%로 FFD를 적용하였다. 변환 전 주형계수는 0.80882이고 변환 후의 주형계수는 0.80925이다.

Fig 3.21 Increase entrance angle and run angle after applying FFD

Fig 3.22는 Local $1-C_P$ 방법으로 δC_P를 보정한 후의 선형을 나타낸다. Min-Max Box 내부의 선형을 제외한 나머지 선형들에서, 길이 방향으로 이동한 새로운 선형이 생성됨을 확인할 수 있다. $1-C_P$ 방법으로 보정한 후의 주형계수는 0.80861이다.

Fig 3.22 KVLCC2 corrected with local $1-C_P$

Fig 3.23에서는 선수부와 선미부의 변형률을 95%로 FFD를 적용하였다. 변환 전 C_P는 0.80882이고 변환 후의 C_P는 0.80823이다.

Fig 3.23 Decrease entrance angle and run angle after applying FFD

Fig 3.24는 Local $1-C_P$ 방법으로 δC_P를 보정한 후의 선형을 나타낸다. Min-Max Box 내부의 선형을 제외한 나머지 선형들에서, 길이 방향으로 이동한 새로운 선형이 생성됨을 확인할 수 있다. $1-C_P$ 방법으로 보정한 후의 C_P는 0.8089이다.

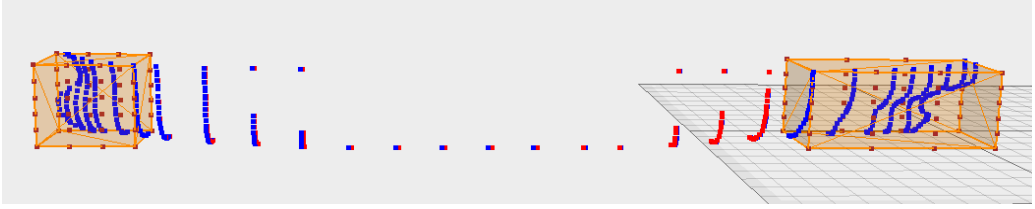


Fig 3.24 KVLCC2 corrected with local $1-C_P$

본 연구에서는 조정점을 퍼센트로 직접 움직이는 방법과 각도를 변경하는 두 가지 방법을 사용한다. 각도를 변경하는 방식 또한 퍼센트로 움직이는 방법과 같은 결과를 나타낸다.

3.7.2 Local $1-C_P$ 검증

3.7.1장의 결과들로 보았을 때, Local $1-C_P$ 방법으로 보정을 한 후의 C_P값이 원본 값과 완벽하게 같지 않음을 알 수 있다. 미세하지만 주형계수의 차이가 나는 이유는 선형이 불연속적이고 Local $1-C_P$ 방법으로 움직일 수 있는 구간이 적기 때문이다. Local $1-C_P$ 의 검증을 위해 Min-Max Box의 크기를 줄이고 움직일 수 있는 section을 증가한 후 Local $1-C_P$ 보정을 수행했다. Fig 3.25에서는 선수부와 선미부의 변형률을 105%로 FFD를 적용하였다. 변환 전 주형계수는 0.80882이고 변환 후의 주형계수는 0.80886이다. Local $1-C_P$ 방법으로 보정을 하였을 때 0.80882로 변환 전 주형계수와 동일함을 확인하였다.

Fig 3.25 KVLCC2 corrected by local $1-C_P$ after applying 105% FFD

Fig 3.26은 선수부와 선미부의 변형률을 95%로 FFD를 적용하였다. 변환 전 주형계수는 0.80882이고 변환 후의 주형계수는 0.80877이다. Local $1-C_P$ 방법으로 보정을 하였을 때 0.80882로 변환 전 주형계수와 동일함을 확인하였다.

Fig 3.26 KVLCC2 corrected by local $1-C_P$ after applying 95% FFD

Fig 3.27은 선수부와 선미부의 변형률을 150%로 FFD를 적용하였다. 변환 전 주형계수는 0.80882이고 변환 후의 주형계수는 0.8093이다. Local $1-C_P$ 방법으로 보정을 하였을 때 0.8088로 변환 전 주형계수와 0.00002 차이가 나는 것을 확인하였다.

Fig 3.27 KVLCC2 corrected by local $1-C_P$ after applying 150% FFD

Fig 3.28에서는 선수부와 선미부의 변형률을 200%로 FFD를 적용하였다. 변환 전 주형계수는 0.80882이고 변환 후의 주형계수는 0.8097이다. 변형률을 증가시켰음에도 Local $1-C_P$ 방법으로 보정을 하였을 때 0.80878로 변환 전 주형계수와 0.00004 차이가 나는 것을 확인하였다. 따라서 $1-C_P$ 보정을 할 때에 움직일 수 있는 section이 많을수록 정확도가 증가함을 알 수 있다.

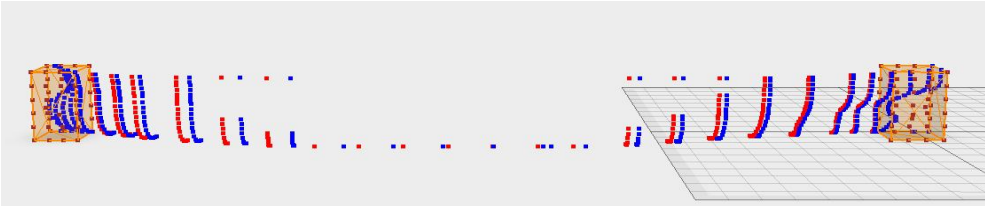


Fig 3.28 KVLCC2 corrected by local $1-C_P$ after applying 200% FFD

Table 3.3은 Local $1-C_P$ 보정 후 결과 값을 비교하였고, Table 3.4는 Local $1-C_P$를 검증하기 위해 Min-Max Box의 크기를 줄인 후 보정한 주형계수 값을 비교하였다.

Table 3.3 Compare C_P at 3.7.1

주형계수 / 변형률	원본	FFD 변환 후	$1-C_P$ 보정 후	오차
105%	0.80882	0.8092	0.8086	0.00022
95%	0.80882	0.8082	0.8089	0.00008

Table 3.4 Compare C_P at 3.7.2

주형계수 / 변형률	원본	FFD 변환 후	$1-C_P$ 보정 후	오차
105%	0.80882	0.80886	0.80882	0
95%	0.80882	0.80877	0.80882	0
150%	0.80882	0.8093	0.8088	0.00002
200%	0.80882	0.8097	0.80878	0.00004

Table 3.3에서 FFD 변환 후 본 연구에서 제시하는 Local 1$-C_P$를 사용하여 주형계수 값을 보정하였을 때의 차이 값은 연구기관에 문의하였을 때 무시할 수 있는 수준이라는 피드백을 받았다. 미세한 값이지만 주형계수의 차이가 나는 이유는 선형이 불연속적이고 Local 1$-C_P$ 보정으로 움직일 수 있는 section이 부족하기 때문이다. 따라서 Min-Max Box의 크기를 줄이고 Local 1$-C_P$를 적용하여 움직일 수 있는 section의 갯수를 늘렸을 때 Table 3.4에서 더 작은 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

제4장 결론 및 고찰

본 연구에서는 선형 변수 중 물가름각과 물모음각을 Free-Form Deformation으로 변환하는 방법을 제시한다. 그리고 변환 과정에서 발생하는 주형계수 값을 보전하기 위하여 Local $1-C_P$ 방법을 제시한다. 선형 데이터는 KVLCC2와 KCS를 사용하였다. Min-Max Box로 선형 전체를 감싼 후 LBD 변환을 수행하였을 때 전체적인 선형이 유지되면서 변형률에 따라 줄어들고 늘어남을 확인할 수 있었다. 그 다음, LBD 변환 후 $1-C_P$ 보정으로 인해 변환 전과 보정 후의 주형계수가 보전됨을 확인하였다. 물모음각과 물가름각의 변화를 위해 선수와 선미를 Min-Max Box로 감싼 후 Free-Form Deformation을 적용했을 때, 선형이 부드럽게 움직이며 각도가 변화함을 확인하였다. 선수와 선미에서 생긴 $\pm\delta C_P$를 선형의 나머지 구간에서 $\mp\delta C_P'$로 보정하기 위해 본 연구에서 제안한 Local $1-C_P$ 방법을 사용하였다. 변환 전과 보정 후의 주형계수가 0.00008~0.00022의 차이가 났다. Local $1-C_P$ 보정 식의 검증을 위해 Min-Max Box의 크기를 줄이고 주형계수의 보정을 위해 움직일 수 있는 section을 증가시켰을 때, 변형률을 50%~100%로 크게 증가시켜도 원본과 보정 후의 주형계수가 0.00002~0.00004 정도 차이가 나는 것으로 그 타당성을 확인할 수 있었다. 따라서 section이 더 많이 나누어진 선형 데이터를 사용한다면 정확도를 높일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 정확한 계산으로 선형 변수를 이용해 자동 선형 데이터 생성 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘을 사용한다면 다양한 선형 데이터를 빠른 시간 안에 확보 가능하다. 또한 선형 데이터들에 해석 결과를 머신러닝 모델에 적용하여 개발한다면, 선형의 해석 “결과”만이 아닌 최적 선형을 “제안”해 중소조선사의 설계 기술 경쟁력 강화에 도움이 될 것이다.

향후 연구로는 여러 선종에 대한 테스트를 진행하고 주형계수뿐 아니라 LCB 값을 보정하는 연구를 진행할 것이다. 또한 본 연구에서는 선형을 움직여 C_P곡선을 생성하였지만, C_P곡선을 사용자가 원하는 만큼 변형하였을 때 곡선이 변형한 만큼 선형이 변환되는 기능이 필요하다.

참고문헌

[1] Sederberg, T.W. and Parry, S.R., “Free-Form Deformation of Solid Geometric Models,” Computer Graphics, 20(4), pp. 151-160, 1986.

[2] Roh, M.I. and Lee, K.Y., Computational Ship Design, Springer, Singapore, pp. 157-160, 2018.

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

[4] Lackenby, H., “On the systematic geometrical variation of ship forms,” British Shipbuilding Research Association, pp. 289-296, 1950.

[5] Choi, H.J., Chun, H.H. and Jung. S.H., 2004, "Fundamental Study for the Development of an Optimum Hull Form," Journal of ocean engineering and technology, Vol. 18, No. 3, pp. 32-39.

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

[7] Harries, S., 1998, Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms, Ph.D. Thesis, Institut fuer Schiffs-und Meerestechnik, Technische Universitaet Berlin, Mensch & Buch Verlag, Berlin.

[8] Kim, H.C., Lee, K.S. and Kim, S.Y., 1998, "Hull Form Representation using a Hybrid Curve Approximation," The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 35, No. 4, pp.118-119.

[9] Kim, H.J. and Chun, H.H., 2000, "Hull Form Generation of Minimum Wave Resistance by a Nonlinear Optimization Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 11-18.

[10] Choi, H.J., Seo, K.C., Kim. B.E. and Chun, H.H., 2003, "Development of an Optimum Hull Form for a Container Ship with Minimum Wave Resistance," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 4, pp. 8-15.

[11] Masuda, S and Suzuki, K., 2001, "Experimental Verification of Optimized Hull Form Based on Rankine Source Method," Journal of Soc. N.A.,Japan, Vol.

236, pp. 27-33.

[12] Markov, N.E. and Suzuki, K., 2001, "Hull Form Optimization by Shift and Deformation of Ship Sections," Journal of Ship Research, Vol. 45, No. 3, pp. 197-204.

[13] Lee, Y.S. and Choi. Y.B., 2009, "Hull Form Optimization Based on From Parameter Design," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 6, pp. 562-568.

[14] Kim, H.C., 2013, "On the Volumetric Balanced Variation of Ship Forms," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 27, No. 2, pp. 1-7.

[15] Park, C.K., 2018, "A Study on the Ship Optimal Design Using Hull Form Variation," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 238-245.

[16] Neu, W.L., Hughes, O., et al., 2000, “A Prototype Tool for Multidisciplinary Design Optimization of Ships,” Ninth Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, Naples, Italy

[17] Kim, T.H., Choi, H.J., 2017, "Study for the Development of an Optimum Hull Form using One Minus Prismatic," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, 19(1), pp 71~76.

[18] Kim, Y.C., et al., 2019, "Prediction of Residual Resistance Coefficient of Low-speed Full Ships using Hull Form Variables and Model Test Results," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 56, No. 5, pp. 447-456.

부록

본 논문에서 제시한 주형계수를 유지하는 물가름각 물모음각의 변환 방법의 과정은 Fig 1과 같다. 본 연구의 구현은 Visual studio C#을 사용하여 구현하였으며, 기하 형상 라이브러리인 Eyeshot을 사용하였다.

Fig 1. Procedure of hull form variation

프로그램의 인터페이스는 Fig 2와 같다. 윗줄의 버튼들은 선형데이터 불러오기, 선형데이터 내보내기, 선형의 주형계수를 계산하고 δC_P 계산하기, FFD를 위한 Min-Max Box 생성하기, FFD 수행의 기능들을 실행할 수 있다.중앙의 Visualization 화면에서 불러온 선형의 옵셋을 가시화하고 그림 2의 아래에 있는 Graph 화면에서 선형의 C_P곡선을 확인할 수 있다.

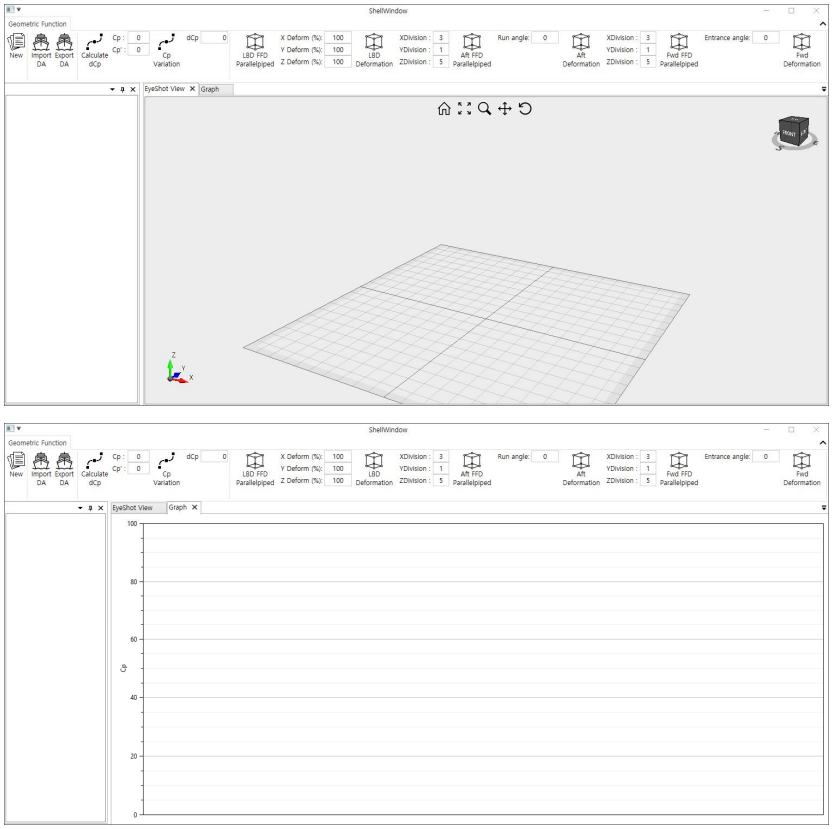


Fig 2. Interface of hull form variation program

-선형데이터 불러오기

Import DA버튼은 선형데이터를 입력받고 저장하는 버튼이다. 선형의 모든 점들을 x,y,z 좌표로 구분하여 저장한 후 Visualization에서 선형을 가시화한다. 선형을 들여오면서 주형계수의 계산도 함께해 Graph화면에서 C_P곡선 또한 확인할 수 있다. Fig 3은 KVLCC2 데이터를 저장하여 가시화한 결과이고 Fig 4는 KVLCC2의 C_P곡선이 그려진 결과이다.

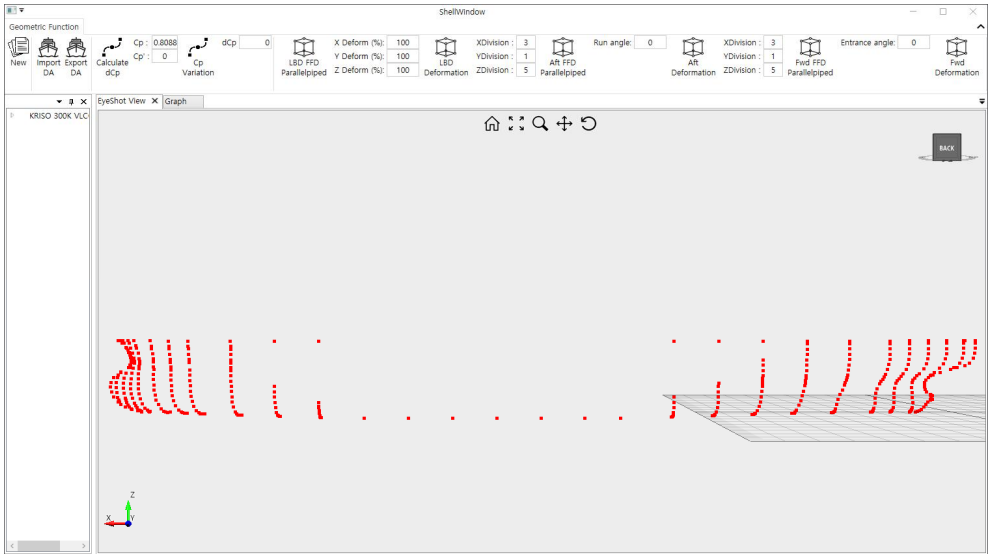


Fig 3. Visualized KVLCC2 offset data

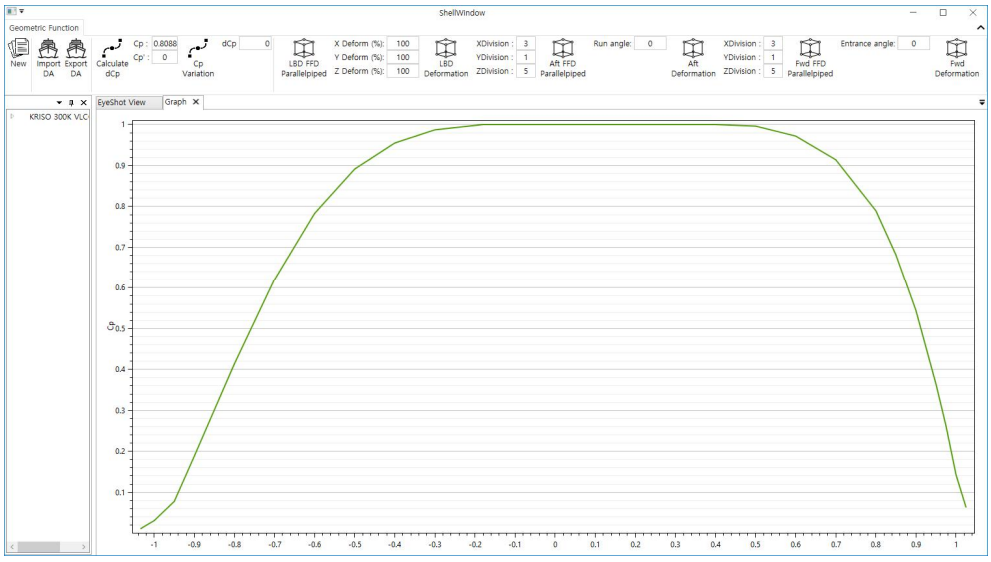


Fig 4. KVLCC2 C_P curve

-LBD 변환

선형을 사용자가 원하는 L,B,D 값에 맞추기 위해 LBD FFD Parallelpipped 버튼으로 Min-Max Box를 생성한다. 그 옆의 Deform으로 X,Y,Z 방향의 변형률을 조절한 후 LBD Deformation 버튼으로 전체 FFD를 수행한다. Fig 5는 KVLCC2를 Min-Max Box로 감싼 모습이다.

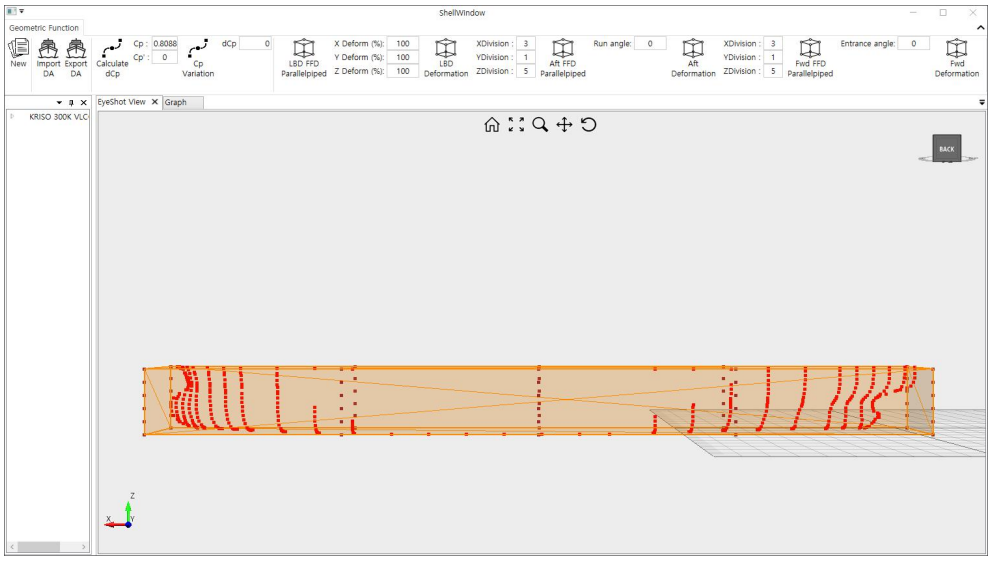


Fig 5. Min-Max Box covering KVLCC2

-1-C_P 보정

선형을 원하는 형상으로 변환한 후 원하는 주형계수의 값을 dC_P에 입력한 후 Cp Variation 버튼을 누르면 dC_P 값에 맞게 주형계수가 변환된다. Fig 6은 dC_P를 0.0009로 입력하였을 때 기존의 주형계수 0.8088이 0.8097로 변환된 선형의 모습이다. Fig 7은 기존 선형의 C_P곡선에서 변환된 선형의 C_P 곡선이 생성된 것을 알 수 있다.

-LBD변환이 수행된 선형 데이터 내보내기

원하는 선형으로 변환시킨 후 Export DA 버튼을 눌러 변환된 선형 데이터를 들여왔던 선형 데이터의 양식과 같게 내보낸다.

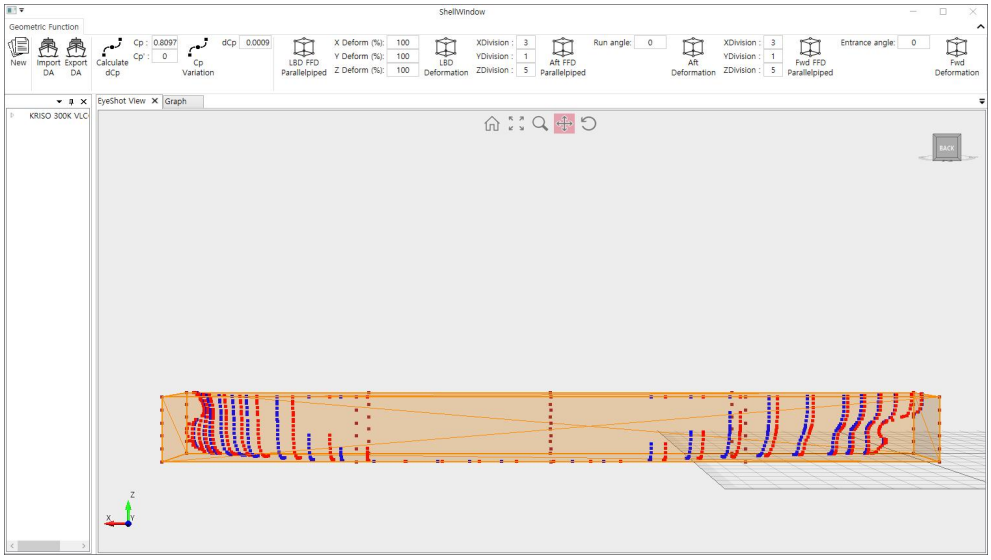


Fig 6. Variated KVLCC2 offset

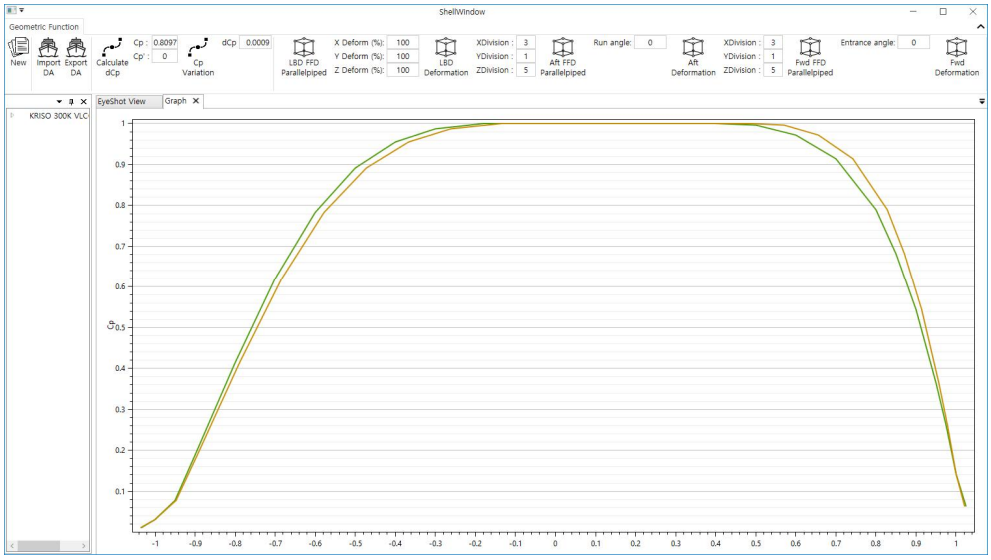


Fig 7. Variated KVLCC2 C_P Curve

-물가름각, 물모음각 변환

LBD 변환이 수행된 선형 데이터를 다시 불러 온 후 Aft FFD Parallelpipped 버튼을 눌러 선미부에 Min-Max Box를 생성한다. Aft Deformation 버튼을 누르면 선박의 기존 각도가 계산이 되어 Run angle에 나타난다. 그 후 물모음각을 원하는 각도로 Run angle에 입력하여 Aft Deformation 버튼을 누르면 물모음각이 원하는 각도로 변환되기 위해 Min-Max Box 안의 옵셋들이 변형된다. 그 후 물가름각 또한 물모음각의 변환과정과 같게 수행한다. Fig 8은 물가름각을 24.6°에서 24.8°로 변환하고 물모음각을 59°에서 59.2°로 변환하였다.

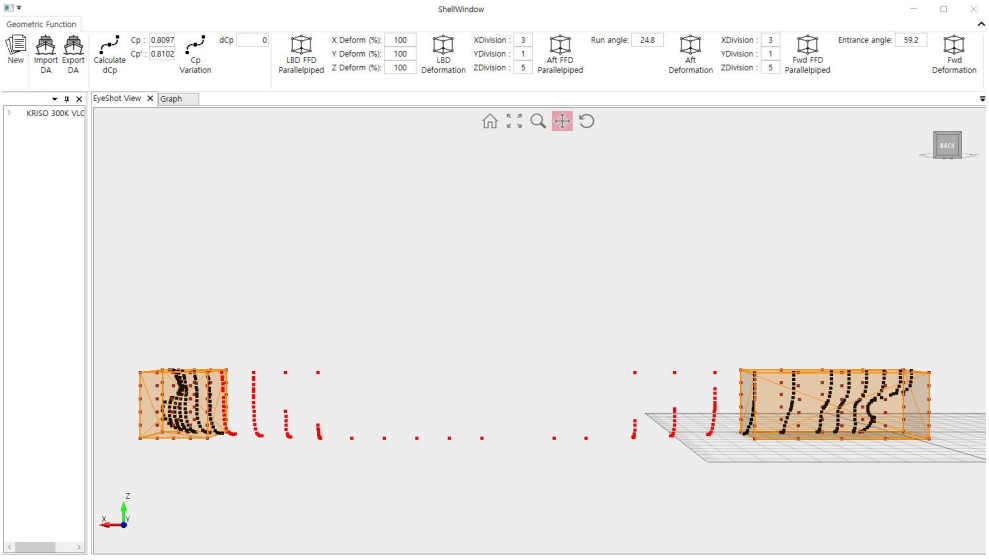


Fig 8. KVLCC2 variated run angle and after angle

- Local 1$-C_P$ 보정

기존의 주형계수 0.8097에서 물모음각과 물가름각이 변형된 선형의 주형계수가 0.8102가 되었음을 Cp'에서 확인할 수 있다. Calculate dCp 버튼을 누르면 기존의 선형에서 Cp'의 차이로 dCp가 계산되어 나타난다. 그 후 Cp variation 버튼을 누르면 Local 1$-C_P$ 보정이 수행된다. Fig 9에서 확인할 수 있듯이 Min-Max Box를 제외한 나머지 section의 옵셋들이 x 방향으로 미세하게 이동하여 새롭게 생성되었다. 주형계수 값 또한 0.8101로 오차는 0.0004이다. 새로운 C_P곡선 또한 Fig 10에서 볼 수 있다.

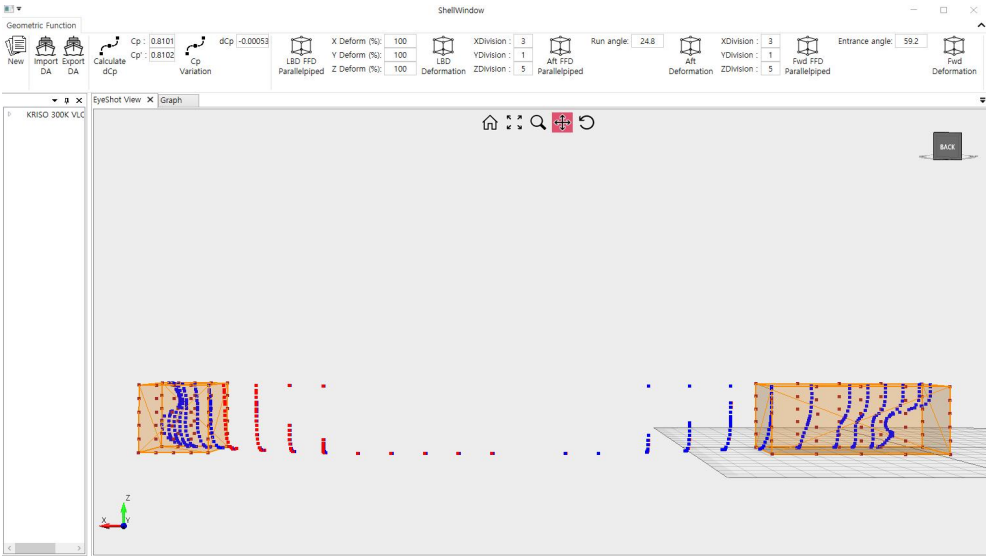


Fig 9. KVLCC2 offset performed Local 1$-C_P$

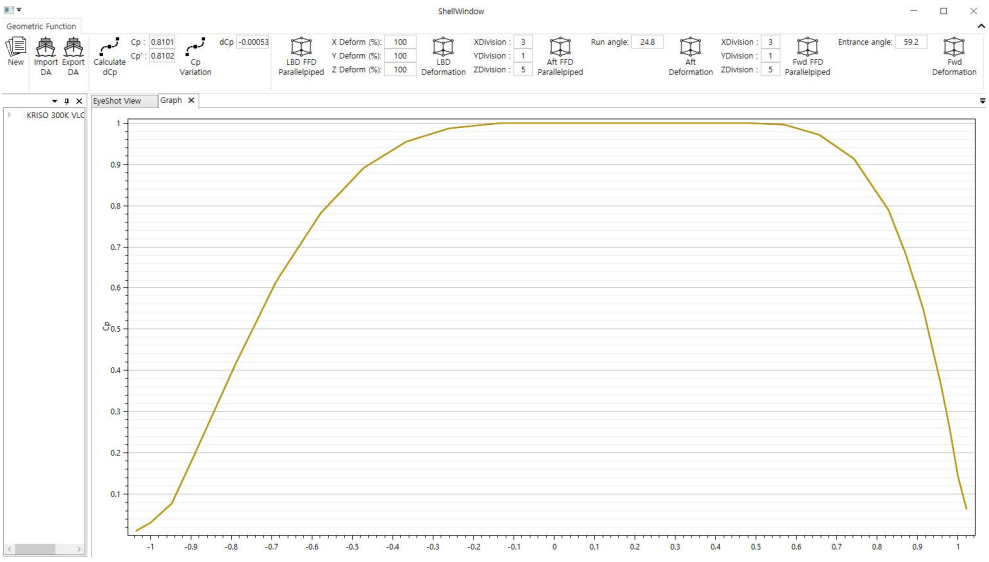


Fig 10. KVLCC2 C_P curve performed Local $1-C_P$

-최종 선형 내보내기

각도를 원하는 만큼 변형하고 Local $1-C_P$로 주형계수를 보정한 후 최종 선형을 Export DA 버튼을 눌러 변환된 선형 데이터를 들여왔던 선형 데이터의 양식과 같게 내보낸다.

Entrance and Run Angles Variation Method of Hull Form Preserving the Prismatic Coefficient

Eunyoung Son
Department of Naval architecture and Ocean engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

There are several methods of hull form variation for initial ship design, such as offset variation, lines variation, and hull form variable variation. In general, this hull form variation is done manually, and different results are obtained according to the designer's know-how. This study proposes a method of converting using the Free-Form Deformation method for entrance angle and run angle among the variables capable of converting hull form. The Free-Form Deformation is method transforming shapes. The variation using Free-Form Deformation method has the advantage of being able to smoothly convert the overall shape of the object to be variated, so the local variation is smoothly controlled when a designer manually transforms. However, if the Free-Form Deformation method is used the variate entrance angle and run angle of the bow and stern, the prismatic coefficient, which is a constraint, will be changed. Therefore, in order to obtain the same prismatic coefficient as before variation, a method of correcting the prismatic coefficient converted $1-C_P$ variation while maintaining the entrance angle and run angle was proposed and the result was verified. The proposed method can shorten the time to generate various hull form data for finding optimal hull form. In addition, it will be helpful to strengthen the competitiveness of small and medium-sized shipbuilders who lack hull form variation technology as it is possible to propose optimal hull form.