

파라메트릭 변환함수를 이용한 선형최적화의 실용화에 관한 연구

김희정*, 최희종*, 전호환*

부산대학교 조선해양공학과*

A Practical Hull Form Optimization Method Using the Parametric Modification Function

Hee-Jung Kim^{†*}, Hee-Jong Choi^{*} and Ho-Hwan Chun^{*}

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University^{*}

Abstract

A geometry modification is one of main keys in achieving a successful optimization. The optimized hull form generated from the geometry modification should be a realistic, faired form from the ship manufacturing point of view. This paper presents a practical hull optimization procedure using a parametric modification function. In the parametric modification function method, the initial ship geometry was easily deformed according to the variations of design parameters. For example, bulbous bow can be modified with several parameters such as bulb area, bulb length, bulb height etc. Design parameters are considered as design variables to modify hull form, which can reduce the number of design variables in optimization process and hence reduce its time cost. To verify the use of the parametric modification function, optimization for KCS was performed at its design speed (FN=0.26) and the wave making resistance is calculated using a well proven potential code with fully nonlinear free surface conditions. The design variables used are key design parameters such as Cp curve, section shape and bulb shape. This study shows that the hull form optimized by the parametric modification function brings 7.6% reduction in wave making resistance. In addition, for verification and comparison purpose, a direct geometry variation method using a bell-shape modification function is used. It is shown that the optimal hull form generated by the bell-shaped modification function is very similar to that produced by the parametric modification function. However, the total running time of the parametric optimization is six times shorter than that of the bell shape modification method, showing the effectiveness and practicalness from a designer point of view in ship yards

※Keywords: Optimization(최적화), Modification function(변환함수), Parametric modification Function(파라미터 변환함수), Wave-making resistance(조파저항), KCS

접수일: 2007년 5월 10일, 승인일: 2007년 10월 3일

†교신저자: hijkim@pusan.ac.kr, 051-510-2757

1. 서론

최적설계란 설계사양을 수학적 모델로 구성하고 이를 수리적인 방식으로 설계치를 구하는 자동화 설계기법이다. 설계자의 통찰력과 경험적 기술에 의존하는 전통적인 설계방식에서도 획기적이고 창의적인 결과를 얻을 수도 있으나, 체계적인 설계 변수의 변화를 얻기가 어려우므로 수리적인 방법으로 설계변수 변화를 구할 수 있는 수치적인 설계법을 생각하게 되었다. 최적설계에서는 중요한 시스템 변수를 최적화 알고리즘으로 변화시켜, 가장 좋은 설계라고 정한 기준의 만족 여부를 확인함으로써 설계를 마치게 된다.

선형 최적화는 최적화 기법을 통해 최적의 선형을 선택하는 부분, CFD를 통한 수치계산을 수행하는 단계 그리고 기존의 선형을 변환하는 세부분으로 구성된다. 목적함수와 제한조건을 도출하기 위한 수치계산은 조파저항을 목적으로 하여 포텐셜 해석을 기반으로 비교적 빠른 선형을 대상으로 수행되어 오다가 최근에 CFD를 이용하여 저속선의 최적화가 시도되고 있다. 최적화 기법은 빠른 수렴성을 보이는 기율기 기반 최적화 기법에서 국부 최소점의 한계를 극복하기 위해 전역 최적화 기법도 사용되고 있다. 선형변환은 최적화 매 단계마다 선형을 자동으로 변환하여 최적화 기법을 통한 선형설계를 가능하게 해준다.

최적화를 구성하는 3가지 항목은 각각 발전되어 다양하게 적용되어 왔다. 특히 선형최적화에 높은 신뢰성 해석의 사용과 수렴이 빠르고 국부해에 빠지지 않는 최적화 기법의 적용에 대해서 꾸준히 연구되었다. Tahara et al.(2004)은 자유수면 조건을 고려한 CFD해석과 변환함수를 이용하여 Surface combatant 최적화를 수행하였고 Peri and Campana(2005)은 전역 최적화 알고리즘을 이용해서 다목적 함수의 최적화를 이용하여 선수형상 최적화를 수행하였다. Jacquin et al.(2004)은 파라메트릭 설계기법(Parametric design)을 이용하여 선수선형 최적화를 발표하였다. Saha et al.(2004)은 천수(Shallow water)에서 조파저항 최적화를 수행하였다.

한편, 선형 최적화의 세가지 요소 중 전체 선형

최적화의 효율성에 많은 영향을 주는 선형변환기법은 크게 3가지로 나눌 수 있다. Mesh movement, Modification function, Parametric design 이다. Mesh movement는 수치계산용 격자생성을 위하여 기존 선형을 B-Spline등의 곡면 Fitting을 수행하여 이들의 Vertex값을 설계변수로 두고 선형을 변환하는 방법이다. 이 방법은 선형 변환후의 순정(fairness)이 나쁘거나 형상제어가 까다로운 단점이 있어 주로 부가물 최적화나 비교적 단순한 선형에 적용되었다(Brizzolara 2004, Yang and Löhner 2004, 김희정과 전호환 2000, 최희중 등 2003, Choi et al. 2005). Modification Function방법은 기존 선형에 변환함수를 이용한 변형량 만을 선체에 반영하여 변형된 선형을 구하는 방법으로 가장 널리 쓰이는 방법이다(Saha et al. 2004, Tahara et al. 2004, Peri and Campana 2005). Parametric design은 Nowachi (1993), Harries et al.(2003)에 의해 연구되고 있는데 선체형상을 형상 파라미터(Form Parameter)를 이용하여 정의하고 이것을 바탕으로 Surface modeling을 하는 방법이다. 형상 파라미터를 이용한 새로운 CAD시스템을 개발하여 Parametric design을 하고 최적화 기법과 직접 연결하여 최적화를 수행한다. 그러나 Parametric design을 위한 CAD시스템은 이미 개발된 우수한 선형을 주어진 형상 파라미터를 이용하여 표현하는데 어려움이 있어 실용적으로 사용되지 못하고 있다.

현재까지 개발된 다양한 최적화 기법은 실제 선형설계자가 사용하기 위해서는 해결해야하는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 첫 번째는 최적도출 시간의 한계이다. 컴퓨터가 발달하고 있지만 좀 더 높은 신뢰성 해석 알고리즘을 추구하고 많은 설계 변수로 인하여 계산시간은 여전히 증가하고 있다. 두 번째는 형상이 복잡한 선형을 정의하고 변환하는 방법이 까다롭다. 또한 선형을 정의하고 변환하는 방법이 실제 설계자가 형상을 변환할 때 이용하는 설계 파라미터를 기준으로 이루어 지지 않아 설계 파라미터를 기준으로 제한조건이 적용되는 다양한 선형설계의 활용에 한계가 있다.

따라서 최적화 기법의 실용성을 높이기 위해서는 설계변수의 수를 줄이고 설계자가 주로 이용하

는 설계 파라미터를 기준으로 선형을 변환하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 Modification Function방법과 Parametric Design방법의 장점만을 이용하여 변환함수를 이용하여 설계 파라미터를 변경하는 파라메트릭 변환함수를 이용하여 선형변환을 하는 새로운 방법을 시도하였다. 파라메트릭 변환함수는 설계 Parameter를 기준으로 선형을 변경하는 점에서는 Parametric Design과 동일하다. 그러나 Parametric Design에서는 설계 전용 CAD시스템을 이용하여 변환을 구현하는 반면 파라메트릭 변환함수는 설계 Parameter를 변환하는 변환함수를 개발하여 선형을 변환한다. 이러한 파라메트릭 변환함수를 사용하면 최적선형의 결과뿐 아니라 각각의 설계 파라미터가 목적함수에 미치는 영향을 알 수 있고 설계 파라미터를 설계 변수로 사용하기 때문에 설계 변수의 수를 줄여주어 실용적인 최적화 기법이 될 수 있다.

본 논문은 파라메트릭 변환함수를 이용한 실용적인 최적화 기법에 관한 연구이다. 개발된 최적화 기법의 실용성을 검증하기 위하여 컨테이너 선형을 대상으로 선수 선형 최적화를 수행하였다. 또한 변환 함수기법의 하나인 종모양 분포 변환함수방법을 이용한 최적화도 함께 수행하여 결과를 비교 검토하였다.

2. 최적화의 3요소

선형 최적화는 기존의 선형을 변환하는 과정과 CFD를 통한 수치계산을 수행하는 단계 그리고 최적화 기법을 통해 최적의 선형을 선택하는 3단계로 이루어지며 최적화 매 단계마다 자동으로 반복 수행된다. 따라서 최적화의 요소를 나누면 크게 최적화 기법, 해석, 변환방법으로 나눌 수 있다.

2.1 Optimization method

최적설계 문제의 정식화를 통해 주어진 문제를 수학적 모형으로 정리한 후 목적함수가 최적의 조건이 되는 설계변수를 찾는데 최적화 알고리즘이 이용된다.

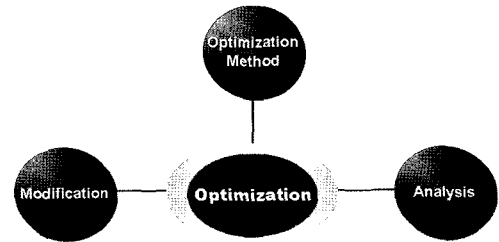


Fig. 1 Three elements of optimization

공학설계문제에서는 대부분 수치해석법을 이용하게 되며 수치해석으로는 기울기 정보를 이용한 국부최적설계법과 확률적 탐색기법을 이용한 전역최적설계법이 있다.

성능해석의 시간이 비교적 긴 문제일 경우 기울기 정보를 이용한 국부최적설계를 이용하면 계산 횟수를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 SQP (Sequential Quadratic Programming)방법을 사용하였다.

2.2 Analysis

성능 비교의 기준이 되는 목적함수를 구하기 위한 방법으로 통계적 방법이 사용되기도 하였으나 최근 컴퓨터의 발달로 인해 해석적인 방법을 주로 사용한다. 최적화 하고자 하는 목적에 따라 선체의 조파저항, 점성저항, 운동, 조종 성능 등이 목적함수로 선택될 수 있다. 이러한 목적함수는 한 개를 사용할 수도 있고 여러 가지의 목적함수를 동시에 사용하여 최적화 할 수도 있다. 조파저항을 목적함수로 사용할 경우 유체를 비점성, 비회전성 이라 가정하는 포텐셜 유동해석을 이용한다. 포텐셜 유동 해석 방법 중 Panel method는 사용하기 쉽고 계산속도 면에서 뛰어나기 때문에 선형 설계에서 가장 많이 사용되는 방법이다. 점성의 영향을 고려하지 않는 조파저항 최소화 수행에 이용되며, ITTC 마찰저항 공식과 함께 전저항 최적화에도 이용된다.

2.3 Modification

변환은 주어진 초기 선형을 체계적으로 변환하여 목적함수가 최소가 되는 형상을 도출하기 위해 최적화 매단계마다 자동으로 초기형상을 변환 하

는 과정이다. 선형변환은 형상이 복잡하고 변환 후 수치해석을 위한 계산격자를 생성할 수 있는 선형 변환 알고리즘이 필요하게 된다. 최적화하고자 하는 영역과 특징에 따라 아래의 3가지 방법이 주로 사용되고 있으며 자세한 내용을 다음 장에 설명하였다.

- Mesh Movement
- Modification Function
- Parametric Modification Function

3. 선형 변환기법

3.1 Mesh Movement

CFD를 이용하여 선형 최적화를 수행하는 경우, 변형된 선체형상에 대해서 CFD 수치계산을 위한 선체 격자계를 생성하여야 한다. Mesh Movement 방법은 격자 생성을 위해 기존 선형을 B-spline곡면 Fitting을 수행하여 이들의 Vertex값을 설계변수로 두고 선형을 변환하는 방법이다. Fig. 2는 Choi et al(2005)이 컨테이너선의 선수부 형상을 Mesh Modification방법으로 표현 하였을 때 계산 격자 모습과 그때의 설계변수를 나타낸다.

Mesh Modification 방법을 사용할 경우 계산 격자를 직접 설계변수로 사용하므로 많은 설계변수가 필요하며, 선형의 변형이 커질수록 선형을 유지하지 못해 완만한 곡면(fair surface)를 보장할 수 없으므로 최종으로 도출된 선형을 모형시형

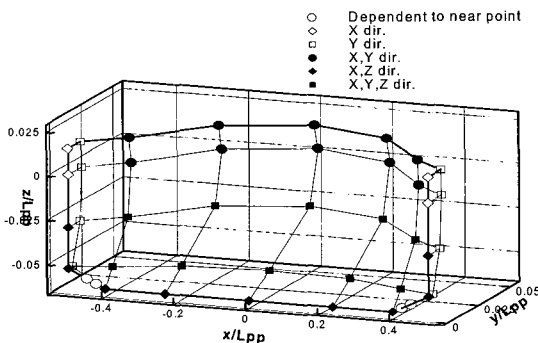


Fig. 2 The design variables for x , y ,z direction in mesh movement

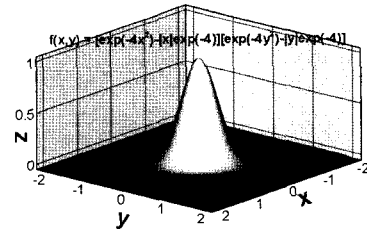


Fig. 3 Bell-shaped modification function

등으로 검증할 경우 곡면 수정 작업이 필요하게 된다. 따라서 선체 부가물 등의 비교적 단순한 형상의 최적화에 주로 이용되고 있다.

3.2 Modification Function

Modification Function을 이용한 선형 변환은 아래 식에 보인바와 같이 기존 선형에 변환함수를 이용한 변형량 만큼 선체에 반영하여 변형된 선형을 구하는 방법이다.

$$Y(x, z)_{new} = Y(x, z)_{old} + \Delta Y(x, z) \quad (1)$$

변환 함수의 선택은 기준선형의 표현방법과 상관없이 독립적으로 택할 수 있으며 최적화를 수행하는 기관마다 고유의 변환함수를 이용하고 있다.

아래 식(2)는 최희중 등(2006)이 사용한 변환함수인 종모양 분포함수(Bell-shape distribution function)를 보여주고 있고 가우시안(Gaussian) 함수를 이용하였다. Fig.3에 이 함수를 도식적으로 보여주고 있다. 종모양 분포함수의 기준점이 설계변수가 되고 종모양 분포함수를 따라 선형 변경이 이루어지므로 선형의 변경 후에도 선체의 형상을 부드럽게 유지시켜주고 설계변수의 수도 줄어드는 장점이 있다. 변환함수를 이용하여 선체의 곡부 혹은 전체 형상변환이 가능하다.

$$\Delta Y(x, z) = \sum_{i=1}^N [e^{-4x^2} - |x|e^{-4}]_i [e^{-4z^2} - |z|e^{-4}]_i \quad (2)$$

3.3 Parametric Modification Function

Parametric modification Function방법은 아래 식에 보인 바와 같이 부분적 또는 전체적으로 공

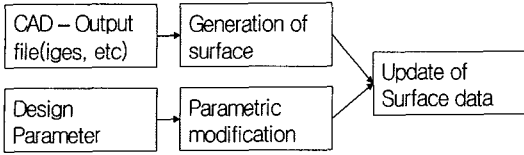


Fig. 4 Steps of the shape modification process using parametric modification function

식화된 형상 파라미터를 변화하기 위한 파라메트릭 변환함수를 이용하여 변형량을 구한 후 기존선형에 더하여 선형을 변환하는 방법이다.

선형 설계자가 직접 선형을 변경할 때는 성능에 영향을 주는 설계 파라미터를 기준으로 변경을 하게 된다. 이러한 개념을 선형 자동 변환에 적용한 것으로 설계 파라미터를 설계변수로 이용한다. 이 방법은 각각의 설계 파라미터가 목적함수에 미치는 영향을 분석할 수 있고 전체 또는 몇 개의 파라미터만을 가지고 최적화 수행이 가능하여 설계자가 사용하는데 편리하다. 그러나 설계 파라미터의 변화에 따른 선형의 변화를 한정해야하는 어려움이 있으며 이것은 설계자에 따라 달라질 수 있어서 선형 변환이 그에 종속적이게 된다. 또한 선택하는 설계 파라미터도 최적화 개발자의 노하우에 의존해야 하는 단점도 있다.

선수 및 선미 선형 설계에 사용하는 설계 Parameter를 아래에 나타내었다.

Fig. 5,6,7은 선수형상 변환에 사용되는 설계 파라미터에 따른 선형 변환모습을 보여주고 있다. Fig. 5는 Cp curve를 변형하는 설계 파라미터이다. 변환영역인 X_0 와 X_1 를 고정하여 두고 변환되지 않는 위치인 X_C 와 변화량 Δx 가 설계변수가 된다. 그리고 벌브면적(Bulb Area)의 변환을 위한 설계 파라미터는 ΔB_A 이다. Fig. 6은 Section 형상변환을 위한 설계 파라미터 ΔY 와 Z_0, Z_1 을 보여준다. Fig. 7은 벌브형상변환을 위한 설계 파라미터이다. ΔB_L 은 벌브 길이변환을 위한 파라미터이고 ΔB_H 와 ΔB_S 는 각각 벌브 높이와 크기 변환을 위한 파라미터이다. 따라서 형상 변환을 위한 설계 파라미터는 한 개 혹은 두 개의 설계 변수를 이용하면 변환이 가능하다

Table 1 Design parameters for KCS hull form optimization

| Design Parameter | Symbol | Annotation |
|------------------|--------------|---------------------|
| Cp curve | Δx | |
| | X_C | Fixed Section |
| Section Shape | Δy | U-V type, DLWL type |
| | Z_0 | |
| | Z_1 | |
| Bulb | ΔB_A | Bulb Area |
| | ΔB_L | Bulb Length |
| | ΔB_H | Bulb Height |
| | ΔB_S | Bulb Size |

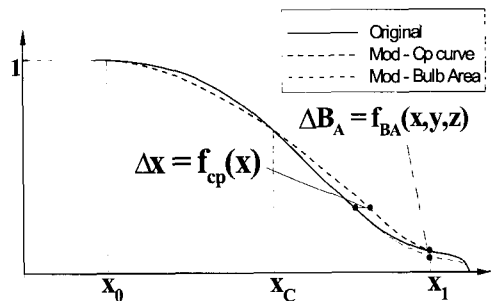


Fig. 5 Design parameters for Cp curve modification

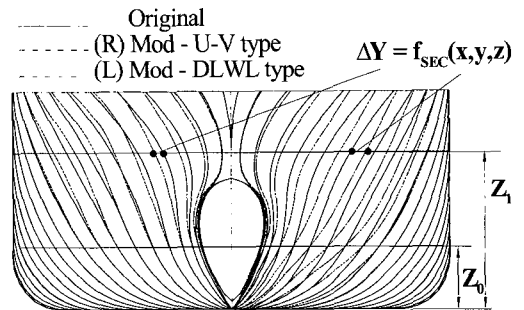


Fig. 6 Design parameters for fore part section shape modification

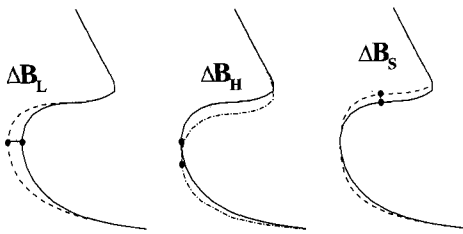


Fig. 7 Design variable for bulb shape modification

Table 2 Principal dimensions for KCS

| | |
|---------------|----------------------------------|
| Initial Ship | KCS (KRISO Container Carrier) |
| Design Speeds | Fn=0.26 |
| LBP | 230m |
| Breadth | 32.2m |
| Draft | 10.8m |

4. KCS 선형 최적화

프로그램의 검증을 위하여 Parametric modification function을 이용하여 최적화를 수행하였다. 대상선형은 KCS(Kriso Container Ship)선형이고 주요요목을 Table 1에 표시하였다. 변환기법의 비교를 위하여 동일한 조건으로 Modification Function방법을 이용한 최적화를 수행하여 비교하였다.

4.1 최적화 수행환경

목적함수는 식 (3)에 보는 바와 같이 전저항으로 두고 Form factor는 0.1로 고정하여 두었다.

$$RT = RW + (1+k) RF \text{ where } k=0.1 \quad (3)$$

RW : wave resistance

RF : the frictional resistance according to the ITTC formula

설계 영역은 선수 40% LBP구간으로 두고 배수량을 제한조건으로 두었다.

4.2 최적화 결과

Parametric modification function method

설계 변수로 사용된 Parametric modification function은 Cp-curve, Section shape(U-V type & DLWL type), Bulb size이다. Fig. 8은 각각의 설계 파라미터가 조파저항에 미치는 영향을 분석한 그림이다. 이러한 분석을 통하여 어떤 설계 파라미터가 목적함수에 가장 영향을 많이 미치는지에 대한 평가도 가능하다. 대상선형의 경우 설계 파라미터중 Cp-curve(●)를 변화할 경우 조파저항이 가장 민감하게 변화하고, Section - DLWL type(▼)를 변화할 경우 조파저항계수의 감소가 가장 크다. 따라서 Section - DLWL type이 조파저항계수를 감소시키는데 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 9는 초기선형과 최적선형의 정면도 비교그림이다. 최적선형이 선수 입사각(Entrance angle)이 증가하고 벌브면적이 증가하였다. 이러한 경향은 Fig. 8에서 보인 설계 파라미터의 Parametric study의 결과와 그 경향이 일치함을 알 수 있다. Table 3는 초기선형과 최적선형의 목적함수 결과이고 Fig. 10은 두선형의 표면 압력분포를 비교한 그림이다. 조파저항이 약 7.6%정도 감소하였고 Bulb를 지난 20 St.과 18 St.부근의 압력분포가 두 선형에서 차이를 보인다.

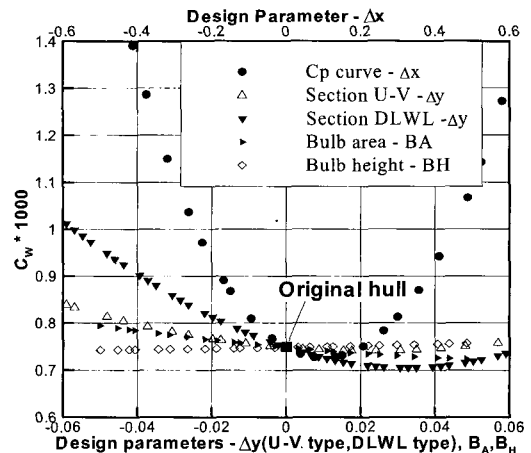


Fig. 8 Parametric study results

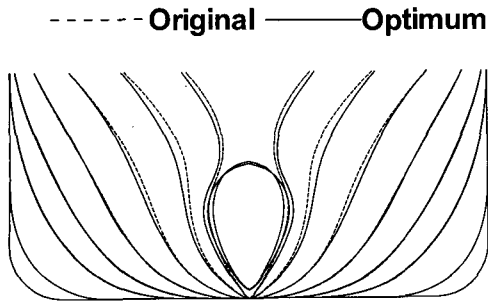


Fig. 9 Comparison of body plans using parametric modification function

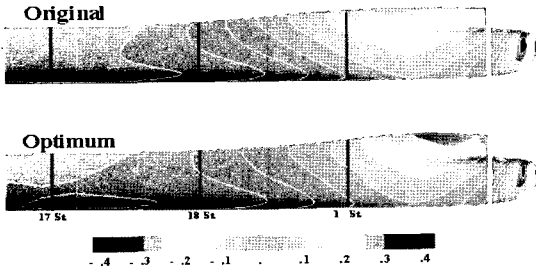


Fig. 10 Comparison of body plan

Table 3 Optimization results of KCS using parametric modification function

| | | | |
|----------------------|------------|-----------|------|
| Iteration number | 4 | | |
| The duration of Time | 5 hours | | |
| | Original | Optimum | % |
| Cw | 0.7122E-03 | 0.691E-03 | 7.6% |
| Rw | 0.425E-01 | 0.413E-01 | 7.4% |
| Rt | 0.1329 | 0.132 | 2.3% |

Bell shaped modification function method

Parametric modification function방법과 비교를 위하여 Bell shaped modification을 이용하여 최적화를 수행하였다. 아래 Fig. 11 에서 보이는 바와 같이 Profile 변환을 위한 4가지 2차원 종모

양 변환함수와 Section변환을 위한 15가지 3차원 종모양 변환함수를 설계 변수로 두고 최적화를 수행하였다. Fig. 12는 초기와 최적선형의 정면도 비교그림이다. Parametric 방법과 동일하게 선수 입사각과 벌브면적이 증가하는 형상으로 도출되었으며 최적선형 형상이 서로 비슷한 결과를 주고 있다. Table 4는 최적수행 결과로 조파저항이 약 10% 감소하였다. Parametric modification function방법과 비교하여 목적함수의 감소가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 Parametric modification function방법은 설계 파라미터 변환에 따른 선형의 변환량이 많이 구속되어 선형변환 폭이 적은 것에 연유된다. 그러나 최적수행 시간은 Parametric modification function방법과 비교하여 약 6배 오래 걸리는 것을 알 수 있다. 설계 시간을 단축하는 대형 조선소의 입장을 고려하는 실용적인 선형 최적화 관점에서는 계산시간이 짧은 Parametric modification function 방법이 유용하다는 것을 알 수 있다.

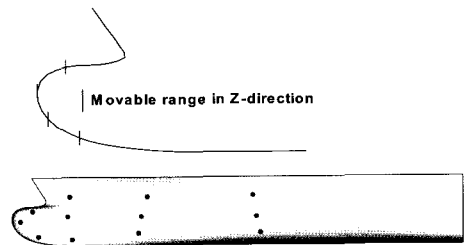


Fig. 11 Design variables using bell shape modification function

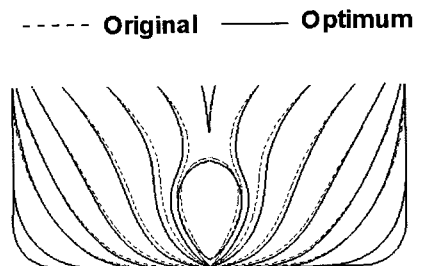


Fig. 12 Comparison of body plan using bell shaped modification function

Table 4 Optimization results of KCS using bell shaped modification function

| | | | |
|----------------------|------------|------------|------|
| Iteration number | 7 | | |
| The duration of Time | 31 hours | | |
| | Original | Optimum | % |
| Cw | 0.7122E-03 | 0.6387E-03 | 10% |
| Rw | 0.425E-01 | 0.383E-01 | 10% |
| Rt | 0.1329 | 0.1291 | 2.9% |

5. 결 론

1. 선형 최적화에 사용되는 변환방법에 관하여 체계적인 고찰을 하였다.

2. 조선소의 설계 관행인 설계자가 직접 선형을 변환하는 방법을 모방한 새로운 최적 설계 Parametric modification function법을 제안하였다. 이는 초기 설계단계에서 각각의 설계 파라미터들이 조파저항에 미치는 영향을 알 수 있으며, 선형 설계자에게 선형개발의 방향을 제시함은 물론 최적화 시간을 크게 단축하는 장점으로 조선소 설계 practise에 적용이 가능한 실용적인 최적 설계 기법임을 보여주고 있다.

3. Modification function방법은 설계 파라미터 방법 보다 선형 변환의 제약이 적어 목적함수의 감소량이 큰 다소 우수한 결과를 주지만 계산시간이 크게 증가하는 실용적인 제약이 있다.

4. 선형 최적화에 사용될 설계 파라미터들에 대한 추가적인 연구가 좀 더 이루어진다면 Parametric modification function에 의한 최적화 기법은 조선소에서 설계 practice로 사용될 수 있는 실용적이고 유용한 설계 도구가 될 수 있다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술재단의 우수연구센터(ASERC)지원과제로 수행된 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

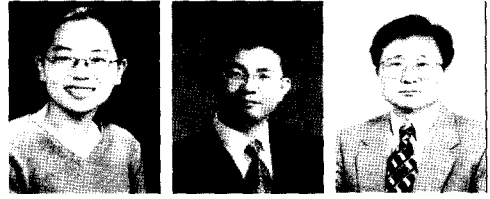
• 김희정, 전호환, 2000, "비선형 최적화 기법에 의

한 최소 조파저항 선형 생성," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 11-18.

- 최희중, 김희정, 전호환, 정광효, 2006, "중모양 분포 변환함수를 이용한 선형최적화 기법에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 43권, 제 5호, pp. 550-559.
- 최희중, 서광철, 김방은, 전호환, 2003, "최소조파저항을 가지는 컨테이너선의 선형최적화기법에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 4호, pp. 8-15.
- Brizzolara, S., 2004, "Parametric Optimization of SWAT-Hull Forms by a Viscous-Inviscid Free Surface Method Driven by a Differential Evolution Algorithm," Proc. of 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, available with CD
- Choi, H.J., Kim, M.C. and Chun, H.H., 2005, "Development of an Optimal Hull Form with Minimum Resistance in Still Water," Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 1-13.
- Harries, S., Abt, C. and Heimann, J., 2003, "From Redesign to Optimal Hull Line by Means of Parametric Modeling," The Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering of the Technical University Berlin & FRIEND SHIP-Systems, COMPIT2003
- Jacquin, E., Derbanne, Q., bellèvre, D., Cordier, S. and Alessandrini, B., 2004, "Hull Form Optimization Using a Free Surface RANSE Solver," Proc. of 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, available with CD
- Nowachi, H., 1993, "Hull Form Variation and Evaluation," J. Kansai Soc. N.A., No. 219, pp. 173-184.
- Peri, D. and Campana, E.F., 2005, "High-Fidelity Models and Multiobjective Global Optimization Algorithms in Simulation-Based Design," Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 3, pp. 159-175.
- Saha, G.K., Suzuki, K., Kai H., 2004, "Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms

in Shallow Water", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 9, pp. 51-62

- Tahara, Y., Stern, F. and Himeno, Y., 2004, "Computational Fluid Dynamics-Based Optimization of Surface Combatant," Journal of Ship Research, Vol. 28, No. 4, pp. 273-287.
- Yang, C. and Löhner, R., 2004, "H₂O: Hierarchical Hydrodynamic Optimization," Proc. of 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, available with CD



< 김희정 > < 최희종 > < 전호환 >