울산대학교 공학연구논문집 제33권 2호 pp. 21~33, 울산대학교.
Journal of Engineering Research Vol. 33, No. 2, pp. 21~33, 2002
University of Ulsan.

휴리스틱탐색기법에 의한 선체구조설계 최적화*

김정제
수송시스템공학부

<요 약>

선체중량을 최소화하는 최적구조설계를 도출하기 위하여는 긴 설계과정을 여러 차례 반복 수행하여야 한다. 복잡하게 구성된 선체구조설계의 종합 과정 중 설계최적화의 기초가 되는 선체중앙단면 구조배치 최적화를 효과적으로 수행할 수 있는 방안을 고안하여 이를 수행할 수 있는 전산화된 설계시스템을 개발하여 그 유용성을 검토하여 보았다. 선체의 중앙단면을 여러 개의 구조단위로 분할하여 각 구조단위별로 국부강도를 만족하는 최적 횡늑골간격 과 종늑골간격을 늑골의 단면형상 최적화와 연계하여 찾아내고, 모든 구조단위들이 종합하여 선체 중앙단면 구조배치의 적합성을 만족할 수 있도록 각 구조단위들의 구조배치를 점차적으로 수정하여 나가는 방법을 적용하였다. 종늑골의 단면최적화에는 네 개의 설계변수에 휴리스틱(Heuristic) 탐색기법을 적용하여 최소 단면적을 주는 것들의 조합을 찾도록 하였다. 휴리스틱 탐색기법을 사용함으로서 최적 선체구조설계를 짧은 시간에 수행할 수 있음을 확인하였다.

Optimization of Ship Hull Structural Design using a Heuristic Search

Jeong Je Kim
School of Transportation Systems Engineering

<Abstract>

Optimization of a ship structural design aimed at light weight is a very delicate and

* 본 연구는 울산대학교 2000 학술연구비 지원으로 수행되었으며 관계당국에 감사드립니다.

time consuming work because of the intrinsic characteristics of complicated interactions among design variables. This paper presents a optimization method for designing a ship midship section. A midship section is divided into a number of structural segments. Transverse frame space and longitudinal frame space for each structural segment are found in consideration of local strength, and then gradually adjusted in a way to get a optimized structural arrangement of midship section satisfying overall longitudinal strength. A heuristic search technique was used for optimizing T-section shape of longitudinal frame.

1. 서론

선체 구조설계는 예상되는 운항 조건하에서 적정한 안정성을 보장할 수 있는 강도를 유지할 수 있는 범위 내에서 최소중량을 주거나 최소 건조비용을 주는 구조배치를 도출해 내는 일이다. 선박은 가해지는 외력이 다양하고 구조형상이 복잡하여 최적 구조설계를 도출해 내는 일이 쉽지 않다. 구조의 강도를 평가하는 기법도 수식적으로 표시된 선급규정이나 유한요소을 이용한 해석적 기법외에 설계자의 경험에 의한 판단이 중요한 부분을 차지한다.

선체구조설계는 일반적으로 여러 단계의 설계를 시행착오법(Trial and Error method)으로 반복수행 하게 된다. 이 전체 설계 과정들이 종합적으로 최적구조배치와 최소부재촌법이 연계되어 수행되는 설계최적화과정을 형성하게 된다.

수 계산에 의하여 이루어지던 이러한 설계과정은 그 후 컴퓨터를 이용함으로서 설계 소요시간을 크게 단축시키게 되었으나 구조설계의 종합적인 최적화는 아직 충분히 달성하지 못하고 있다. 울산대학교에서는 기존의 설계구조설계과정을 컴퓨터이용에 적합하도록 재구성하고 계산에 의한 설계와 해석에 의한 설계를 통합하여 수행할 수 있는 종합적 구조 최적화 설계 기법을 고속 쌍동여객선을 대상으로 개발[1,2] 하여 소정의 성과를 올린바 있으며 같은 기법을 단동선 함정에 적용하여 실용성을 한층 더 향상시킨바 있다. 그러나 이 설계 시스템은 기존의 설계과정을 기본적으로 준용하여 대화식(interactive)으로 수행하도록 되어있어 다단계로 이루어지는 최적화를 만족스럽게 수행하는 데는 아직 미흡하다.

본 연구에서는 여러 개의 설계변수로 구성된 늑골의 T-형 단면 설계문제에 적절한 휴리스틱 탐색기법을 구사하여 자동으로 짧은 시간에 최적화를 수행하도록 하는 방법을 시험 개발하여 선박구조 설계 최적화의 능률을 향상시킬 수 있도록 하였다.

2. 구조배치 최적화

선체의 중량을 최소화하거나 건조비를 최소화하는 설계는 이를 만족하는 설계변수들의 조합을 찾아내는 일이 되고, 이를 위해서는 각 설계변수들의 변화에 따른 중량이나 건조비의 변화 거동을 구하여 최적치를 찾아내는 일을 수행하여야 되는데. 이 일은 각 설계변수들간의 간섭효과가 있으므로 무수히 많은 횟수의 반복설계를 요구한다. 이러한 문제를 해

결하기 위하여 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)[3,4], 유전 알고리즘[5]등과 같은 최적화 기법들이 시도되었다.

이러한 탐색기법들은 변수들이 경계선을 효과적으로 피하여 최적치에 접근하거나, 많은 수의 변수로 문제가 구성되어있는 경우 변수들이 빠른 시간에 최적치에 접근하는데 효과적이다. 그러나 이런 방법들은 최적화를 일괄적으로 자동처리 해냄으로써 그 결과의 신빙성을 보장하기 어려우며 또한, 단순 수식으로 반영하기 어려운 설계변수들의 특성, 재료수급조건 등 설계자의 경험과 지식을 반영하는데에는 한계가 있다. 재료 수급 조건을 고려하기 위하여 표준부재를 데이터베이스화 하여 이 데이터로써 최적화 탐색을 하는 방법[6]으로 재료의 조달문제를 재료비용과 연계하여 효과적으로 반영하는 방법이 있다. 또한, 중앙단면 설계에 영향을 주는 크고 작은 변수들을 일괄적으로 처리하지 않고 선체종강도를 지배하는 큰 변수들과 국부강도에 영향을 주는 작은 변수들을 구분하여, 선체 종강도를 만족하는 거시적 최적화를 수행한 후 선체 구조부위별 부재를 최적화하는 두 단계 최적화법[7]을 시도하여 보다 현실적인 최적설계에 접근한 경우도 있다. 그러나 이 방법들도 기본적으로는 일괄 최적화 처리방법을 택함으로써 실제 설계에서의 다양성과 유연성을 제대로 반영하는 데에는 문제점을 가지고 있다.

따라서, 구조설계최적화가 실용적이기 위해서는 설계자의 지식에 의한 판단이 반영될 수 있도록 그 설계 시스템이 구성되어야 한다. 이를 위해서는 수식으로 이루어지는 종래의 설계과정을 준용하여 중량을 최소화하는 최적설계과정을 설계하여 운용하되, 각 진행 단계에서 최적화의 결정에 필요한 자료를 전산으로 처리하여 주고 판단은 설계자가 할 수 있도록 하는 대화식 방법이 바람직하다. 따라서 본 최적화 시스템에서는 상세계산에의한 설계와 해석에 의한 설계에서의 반복 설계횟수를 최소화 할 수 있도록 선체중앙단면의 다소 근사한 최적구조배치를 대화식으로 수행하여 짧은 시간에 도출해 낼 수 있는 전산시스템을 구축하기로 하였다.

선박의 구조는 종강도, 횡강도 및 국부강도를 동시에 만족시켜야 한다. 선체 중앙단면 각 부위가 국부강도를 만족하기 위해서는 횡늑골간격(Transverse Space), 거더간격(Girder Space) 및 종늑골간격(Longitudinal Space)의 크기에 따라 그 중량이 변하게 되는데, 최소중량을 주는 이 세 변수들의 값이 존재한다. 선체 종강도를 효과적으로 만족시키기 위해서는 가급적 중앙단면의 중립축으로 부터 먼 부위에 중량부재를 배치하는 것이 효과적이다. 따라서 선체중량 최소화를 달성하기 위해서는 중앙단면의 중립축 부위의 부재는 국부강도를 만족하는 최소부재로하고, 상갑판과 선저근처에 선체종강도를 만족하도록 부재를 배치하도록 하여야한다. 이러한 개념하에서, 최적화는 선체중앙단면의 각 구조단위(Segment)별로 국부강도를 만족하는 최소부재들을 먼저 구해 놓고, 이들을 종강도를 가장 효과적으로 만족시키는 방향으로 부재치수들을 점차적으로 증가시켜 중앙단면계수의 요구치를 만족시키도록 하는 최적화과정을 설정하여 전산화하였다.

선체중앙단면 각 부위의 횡늑골간격은 공통이고, 거더간격 과 종늑골간격은 기본적으로 독립적이다. 그러나 거더간격은 각 부위별로 임으로 선택할 수 있는 자유변수가 아니고 중앙단면 기본 형상 설계시에 그 위치가 이미 정하여 지는 것이다. 또, 갑판, 프라트폼(Platform), 선저등 수평구조단위들의 종늑골(Longitudinal)들은 횡격벽의 수직 보강재들과 서로 연결될 수 있도록 그 간격이 동일하여야 한다. 따라서 중앙단면 구조배치를 최적화하는 일은 중앙단면 전체에 공통 횡늑골간격을 적용하고 각 구조단위별로 독립적인 종늑골간격을적용하되, 갑판, 프라트폼 등 수평구조물에는 공통 종늑골간격을 적용하여 중앙단면

의 최소중량을 주는 이들 변수들을 구하는 문제가 된다.

또한 최소 중량을 주는 설계를 얻기 위해서는 종늑골 과 횡늑골의 단면형상을 최적화하는 일이 필요한다. T-형 단면의 경우 요구되는 단면계수를 최소중량으로 만족시키기 위해서는 가능한 범위 내에서 웹(Web)의 깊이를 크게 하고 단면적을 웹보다는 프렌지에 배정하도록 하여야 한다. 이 일을 위하여 웹의 깊이와 두께 및 프렌지의 폭과 두께의 범위를 설정하여 최소중량의 것을 찾아 선택하는 방법[6,7]이 있으나 이들은 웹이나 프렌지의 좌굴조건을 적절히 반영하지 못한다. 웹의 좌굴문제를 고려하기 위하여 웹에 보강재(Stiffner)를 배치하여 최소중량을 주는 보강재간격을 찾도록 하는 방법[4]도 있으나 이 방법은 초대형 선박 외에는 적용될 수 있으며 프렌지의 좌굴은 고려하지 못하고 있다. 따라서, 종늑골 및 횡늑골에 대하여 웹의 좌굴 과 프렌지의 좌굴한계범위 내에서 가해지는 단면계수를 만족하도록 T-형 단면형상을 최적화하는 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

늑골의 단면형상 최적화는 전체 최적화과정중에 많은 횟수의 수행이 필요함으로 설계소요시간에 크게 영향을 주는 문제이다. 따라서 본 연구에서는 짧은 시간에 처리될 수 있는 적절한 휴리스틱 탐색 알고리즘을 개발하여 적용하였다.

선체의 국부강도를 지배하는 외력(Sea Pressure, Slamming Pressure, Deck load)은 중앙단면의 각 부위별로 주어지므로 이 외력의 차이를 고려하여 중앙단면을 적절한 크기의 구조단위(Segment)로 분할 설정하여 설계를 수행하도록 하였다.

구조설계는 또한, 건조상의 제약조건들을 고려하여야 한다. 그러나 구매가능 부재의 규격, 브라켓의 크기, 스롯(Slot)의 크기, 용접조건 등은 상세 구조설계에서 결정할 사항으로, 본 세부 시스템에서는 고려하지 않기로 하고, 구매와 공작이 가능한 부재의 최소규격은 적용할 수 있도록 하였다.

이상과 같은 개념 하에서 아래와 같은 목표를 설정하여 구조설계 최적화 기법을 개발하도록 하였다.

- 단동함정의 강선 선체를 대상으로 선체중량을 최소화 할 수 있는 중앙단면설계 최적화기법을 개발하고, 이를 실용화 할 수 있도록 전산화 한다.
- 중앙단면의 최적화는 선체종강도와 국부강도를 만족하는 구조배치 최적화단계 와 늑골의 단면형상 최적화단계를 엮어서 대화식 설계과정으로 수행되도록 한다.
- 종늑골의 T-형 단면형상 최적화에는 짧은 시간에 처리될 수 있는 휴리스틱 탐색기법을 적용하였다.
- 기본 구조설계는 미 해군의 Naval Sea System Command의 Structural Design Manual for Naval Surface Ships에 준한다.
- 본 과제에서 개발된 전산시스템은 차후 수행될 세부적인 구조설계 및 해석에 의한 구조강도 검토를 위한 초기자료로서의 중앙단면의 최적 기본 구조배치를도출한다.

3. 최적화 문제의 설정

3.1 중앙단면의 기본 모형

설계대상 함정의 중앙단면의 기본형상은 국내에서 건조된 기존설계 138m급 선박의 것을 준용하여 아래 그림과 같은 것으로 하였다. 세 개의 유효갑판와 하나의 프라트폼 과 이중저로 구성되었고 가침수구역을 위한 종격벽을 두고 있다.

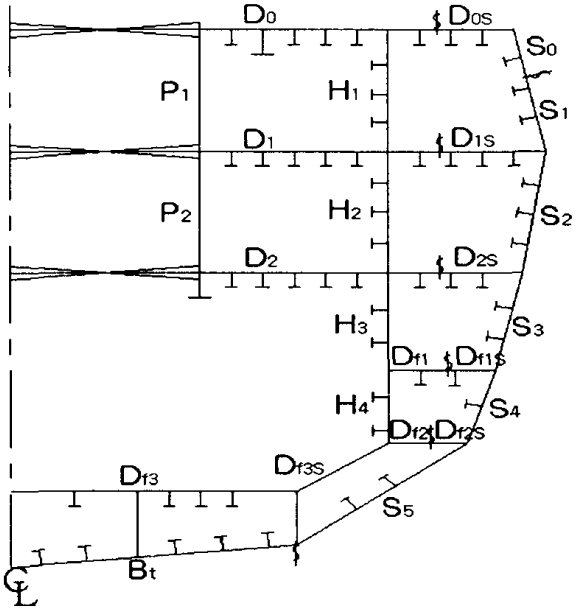

Fig. 1 Midship Section

종격벽 과 거더의 위치는 구조형상 설계 시 미리 정해지는 것으로 하였다.

이상과 같이 중앙단면의 기본 구조형상을 설정하여 놓고 갑판이 2-3개인 경우, 프라트폼이 1-2개인 경우, 종격벽이 있거나 없는 경우 등 사용상의 유연성을 위하여 본 초기구조설계 최적화 과정에서는 50개의 구조단위까지 수용할 수 있도록 하여 전산화 하였다.

3.2 각 구조단위의 최적화 문제

위에 설정된 중앙단면 구조배치 최적화는 각 구조당위에 대하여 선체거더굽힘응력 (Primary Bending Stress; fb)와 국부외력(p)을 효과적으로 지탱할 수 있는 외판의 두께(t)와 거더, 횡늑골(Transverse Frame) 및 종늑골(Longi. Frame) 들의 크기 즉, 7개 변수의 최적 조합을 구하는 일이 된다.

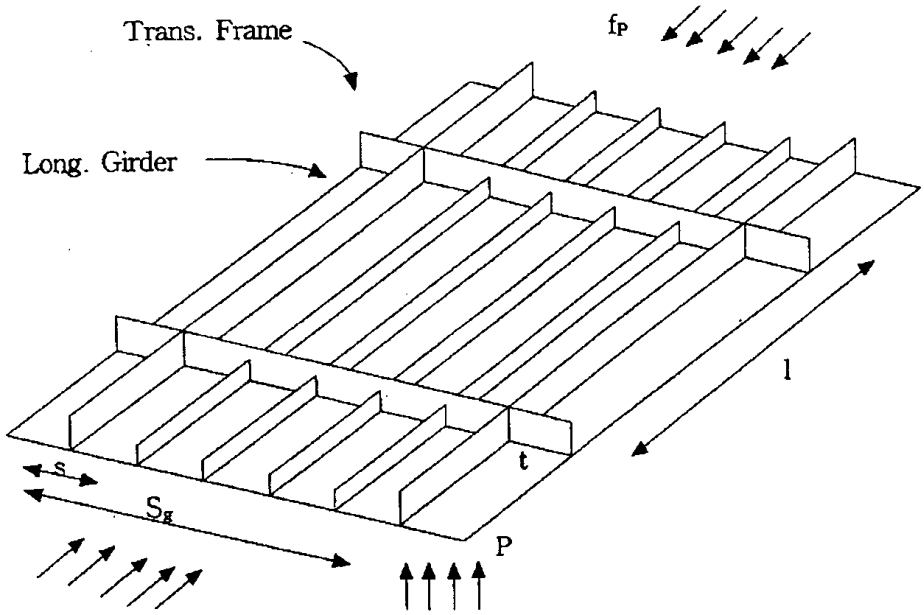

Fig. 2 구조 Segment의 Grillage

그러나 이들 중 거더간격은 자유변수가 될 수 없고 선체구획 배치시 정하여 진다. 따라서 중앙단면의 구조배치 최적화 문제는 다음과 같이 설정된다.

Opitimization Problem

Objective : Minimum Weight per Meter Ship Length

Find : - Trans. Space and Trans. Scantling
- Longi. Space and Longi. Scantling
- Plate Thickness

Constraints : - Overall Section Modulus of Midship
- Local Bending Stress + Primary Stress for Longi.
- Buckling Stress for Longi.
- Bending Stress for Plate
- Buckling Stress for Plate
- Local Bending Stress for Girder
- Local Bending Stress for Trans. Frame

Preset : - Girder Space
- Minimum Possible Thickness of Plate : $(t_{ini})_i$

3.3 T-단면 형상최적화 문제

위의 중앙단면 부재배치 최적화 과정중 종늑골의 촌법을 결정하는 단계에서 선체거더굽힘응력 (Primary Bending Stress; (fP))와 국부외력(p)을 지탱 할 수 있는 최소단면적의 T-형상을 구하는 문제이다. 이것은 외력을 효과적으로 지탱할 수 있는 T-형의 웹(Web)의 깊이와 두께 및 프렌지의 폭과 두께의 4개변수의 최적 조합을 구하는 일이 된다.

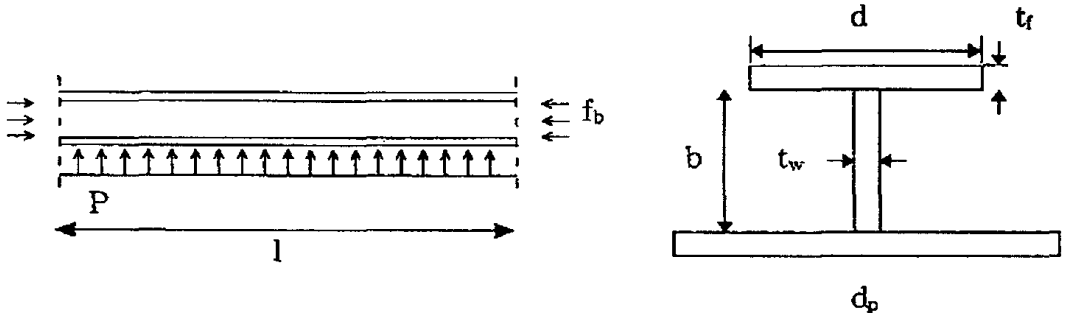

Fig.3 T-section of a longitudinal

이 최적화는 국부외력에 의하여 가해지는 굽힘응력을 효과적으로 지탱할 수 있도록 가급적 웹의 깊이(b)를 크게하고, 면적을 웹보다 프렌지에 많이 배정하는 일이 되나, 종늑골의 좌굴, 웹의 좌굴 및 프렌지의 좌굴(Lateral Buckling)에 의하여 제한을 받는다.

따라서 T-형 단면 최적화 문제는 다음과 같이 설정된다.

Objective : Minimum Section Area

Find : - Web의 Depth(b)
- Web의 Thickness(tw)
- Flange의 Width(d)
- Flange의 Thickness(tf)

Constraint : - Local Bending Stress + Primary Stress
- Column Buckling Stress
- Web의 Plate Buckling Stress
- Flange의 Lateral Buckling Stress

Preset : - Web의 Minimum and Maximum Height
- Web과 Flange의 Minimum Thickness

4. 최적화 알고리즘

4.1 중앙단면 구조배치 최적화 알고리즘

위에 설정된 최적화를 수행하기 위한 전산알고리즘은 Fig. 4와 같이 설계하였다. 이 알고리즘의 수행은 선박의 기본 입력데이터와 함께 각 구조단위의 판, 횡늑골 및 종늑골의 최소촌법을 미리 임의로 설정하고 입력하여 시작된다.

일정한 간격으로 증가하는 각 횡늑골간격에 대하여 그리고, 각 구조단위의 일정한 간격으로 증가하는 종늑골간격에 대하여,

- 판의 두께가 국부강도를 만족할 수 있을 때까지 증가되고,
- 종늑골의 크기가 국부강도를 만족할 수 있을 때까지 증가되며,
- 거더 와 횡늑골 국부 강도를 고려한 최소촌법을 구하여,
- 각 구조단위의 최소중량을 주는 종늑골간격을 찾고,
- 설정된 횡늑골간격에 대한 모든 구조단위들의 부재의 촌법들로 중앙단면의 단면계수(Section Modulus)를 계산하여, 요구치에 미달되면, 각 구조단위의 판의 두께를 설계자의 자의로 적절히 증가시켜,

이상의 과정을 만족스러울 때까지 반복한다.

이와 같은 최적화 과정을 동일한 종늑골간격이 요구되는 갑판, 프라트폼 및 선저구조단위에 대하여는 공통 종늑골간격이 적용되도록 하며, 선측판구조, 종격벽구조들에 대하여는 각각 독립적으로 적용되도록 하였다.

4.2 T-형강재 단면형상 최적화 알고리즘

위에 설정된 T-형강재 단면형상 최적화를 수행하기 위한 전산알고리즘은 Fig. 5와 같이 설계하였다. 이 알고리즘의 수행은 요구 단면계수에 대하여 사용가능한 범위에서의 최소 웹의깊이 / 프렌지 폭 비로 가정한 표준형상의 T단면을 우선 구하고 T-단면 4개의 설계변수들을 단면계수와 설정된 구속조건(Constraints)을 만족시키는 범위 내에서 단면적을 감소시키는 방향으로 증가시키거나 감소 시켜나가 최소 단면적에 도달 할 때까지 계속한다. 이 진행과정에서 변화시킬 설계 변수를 찾는데 휴리스틱 탐색기법 중 Steepest Ascent Climbing 기법 적용하여 다음과 같은 알고리즘을 설계하였다.

표준형상 T-단면의 변수값 들이 얻어지면 Fig5와 같이 초기 조건에 만족하는 T-단면형상의 변수들이 기초노드(Root node)가 되며 동일한 단면적이 증가하도록 각각의 4개의 변수 값을 증가시켜 노드를 생성한다. 만일 제한 조건에 저촉되는 노드가 발생한다면 그 노드는 계산에서 제외한다. 그리하여 4개 이하의 자 노드(Children Node)가 생성되며 평가함수 f(N)을 계산하여 값이 가장 큰 노드를 선택하게 된다. 하나의 새로운 자 노드로 이동할 때마다 단면계수 (Zcal)를 계산하여 요구단면계수 (Zreq)와 비교하여 Zcal값이 크다면 탐색을 중단한다.

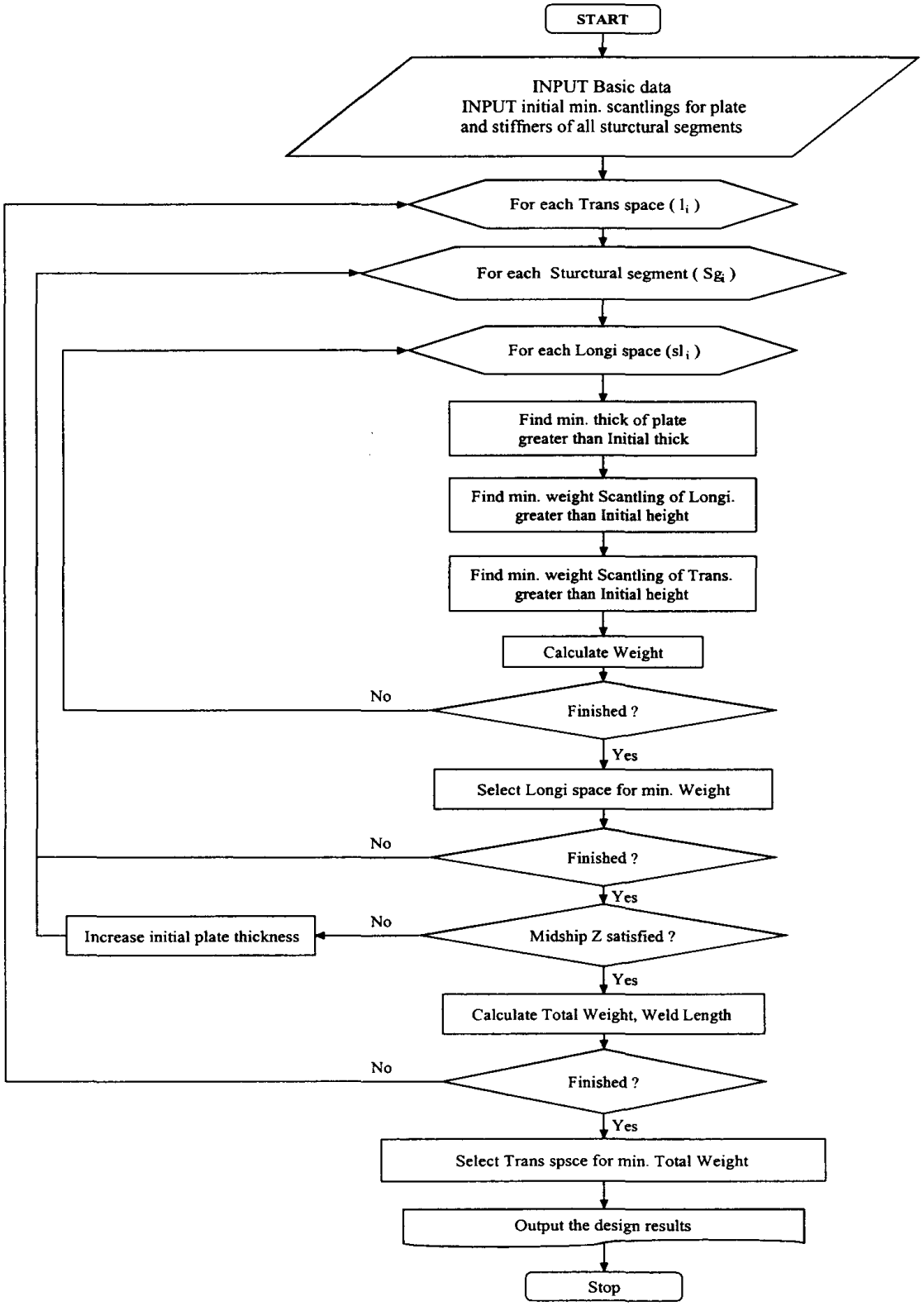

Fig. 4 Optimization Algorithm for Midship Section Structural Arrangement

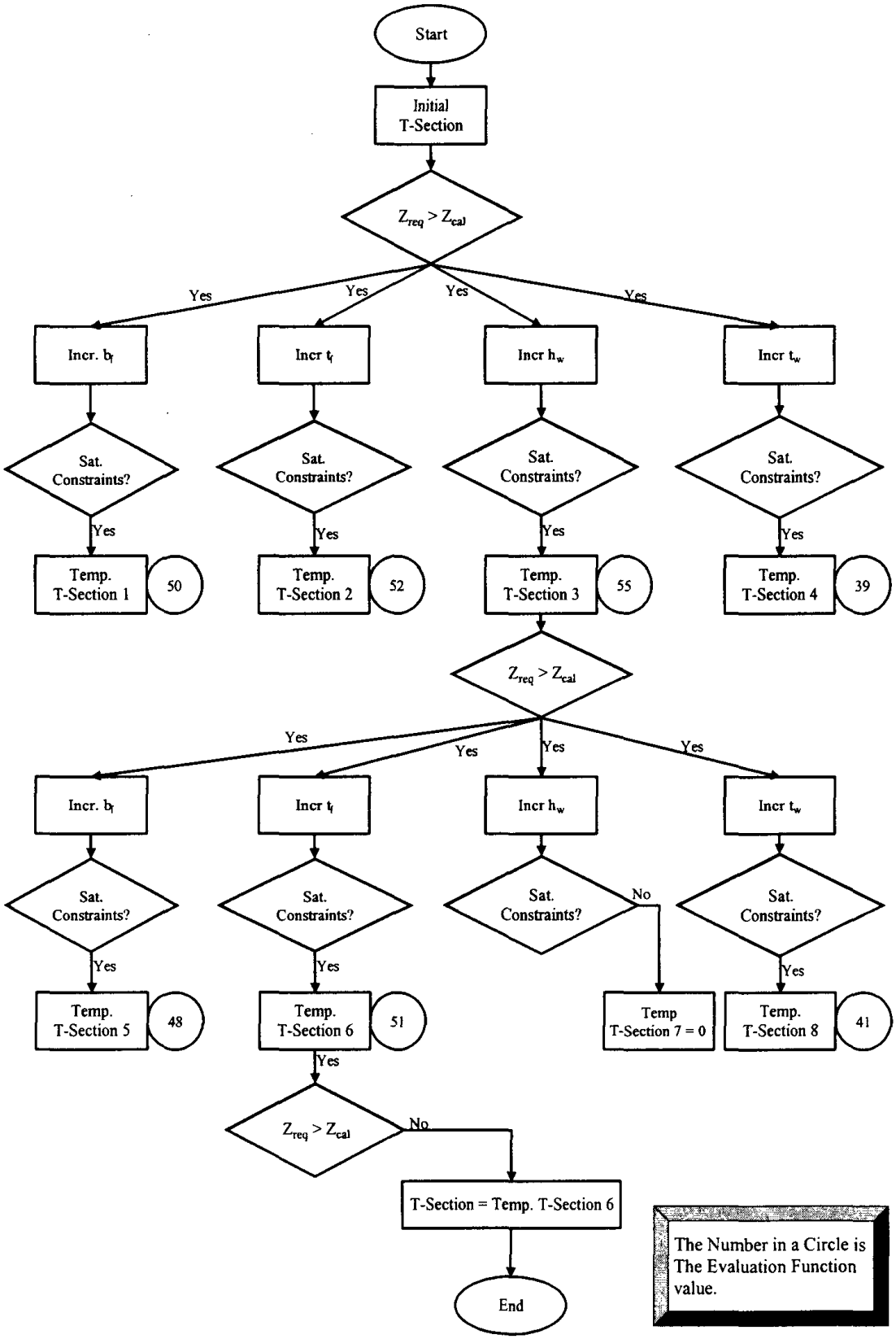

Fig. 5 Steepest-Asent Climbing Search Applied to T-Section Scantling

5. 검 토

앞에서 설정된 중앙단면 구조배치 최적화 시스템을 전산화하여 시험하여 얻은 자료를 Fig. 6~9에 보여주고 있다. 이 자료들로부터 다음과 같은 특성을 정리할 수 있다.

- Fig. 6은 구조단위별 독립적으로 최적화 하였을 때의 종늑골간격과 중량 관계를 보여주고 있다. 구조단위별 중량곡선은 오목형 곡선을 나타내고 있으나, 판의 두께를 인위적으로 증가시킴에 따라 굴곡이 점차 완만하여 진다. 따라서 종늑골간격의 최적화는 상갑판이나 선저구조와 같이 선체중앙단면의 단면계수를 증가시키기 위하여 외판을 인위적으로 많이 증가시킨 부위에서는 중량감소에 별로 기여하지 못함을 보여주고 있다.
- Fig. 7은 선체 종강도를 고려하고 구조단위를 독립적으로 최적화 하였을 때의 횡늑골 간격과 중량 관계를 보여주고 있다. 곡선은 선체거더굽힘응력(Primary Stress)이 크게 걸리는 선저구조에 선체선체거더굽힘응력이 적게 걸리는 중립축 근처의 내부구조(Tween Deck)보다 더 적은 횡늑골간격에 최소중량점이 있는 것을 보여준다.
- Fig. 8은 T-단면을 최적화 하는데는 휴리스틱 탐색기법으로 설계 최적화 시간을 크게 단축시킬 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결 론

선체중량을 최소화하기 위하여 선체중앙단면을 여러개의 구조단위로 분할하여 구조배치와 부재촌법의 최적조합을 단계적으로 찾아가도록 하는 최적설계시스템을 설계하고, 늑골의 T-형 단면 최적화에 휴리스틱 탐색기법을 사용하여,

- 적절히 적용된 휴리스틱 탐색기법으로 설계최적화 시간을 크게 단축시킬 수있으며,
- 그 영향으로 대화식으로 개발된 구조설계최적화 시스템의 실용성을 높일 수 있음을 확인하였다.

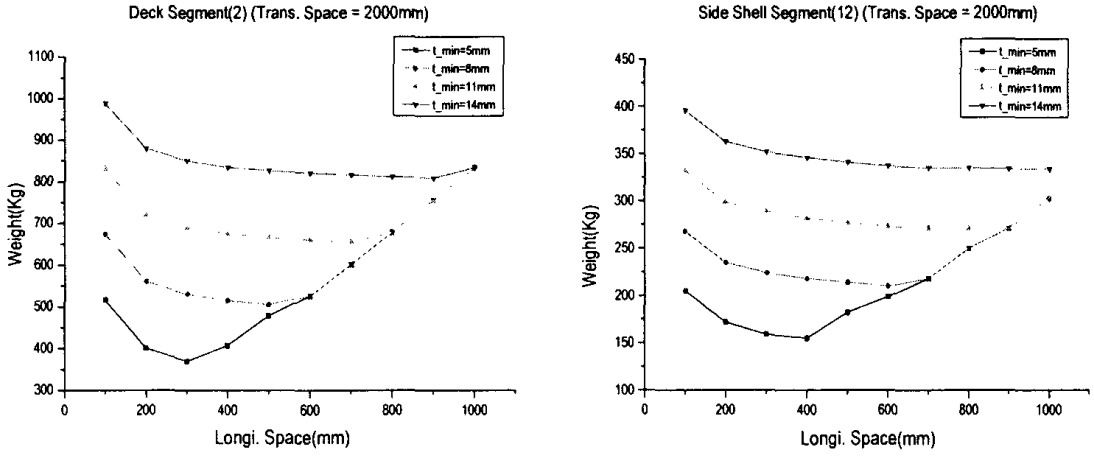

Fig. 6 Longitudinal Space-Weight Relations When Optimized with Minimum Thickness of Plate

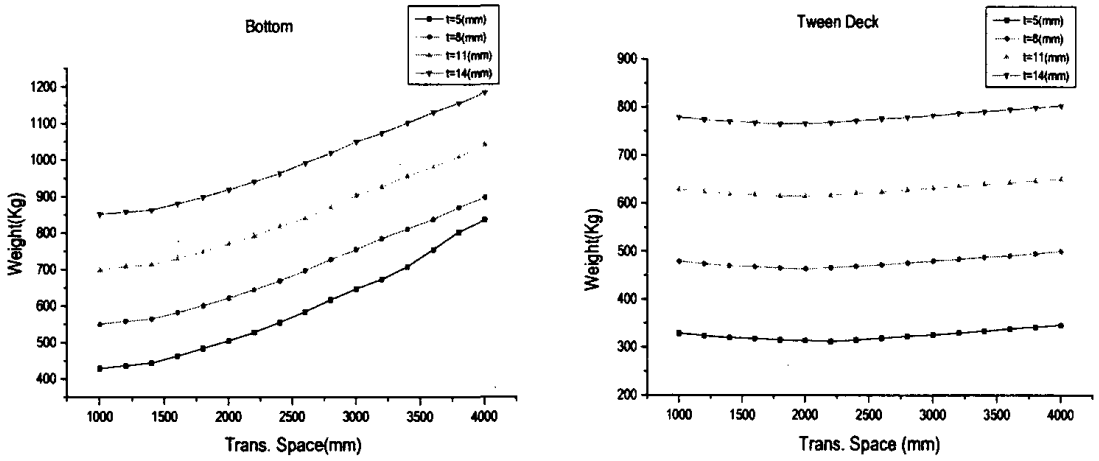

Fig. 7 Transverse Space-Weight Relations When Optimized with Minimum Thickness of Plate

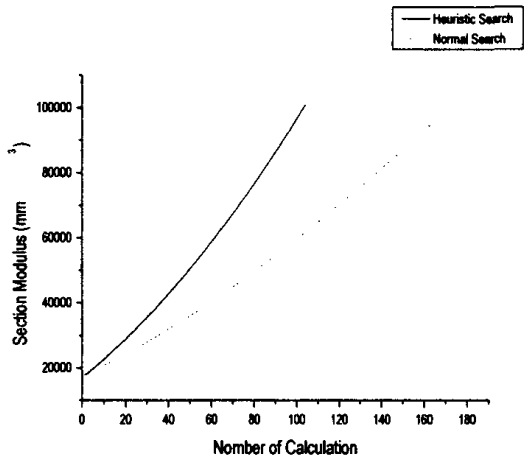

Fig.8 Comparition in Number of Calculations Required for Obtaining a Target Section by Heuristic Search.

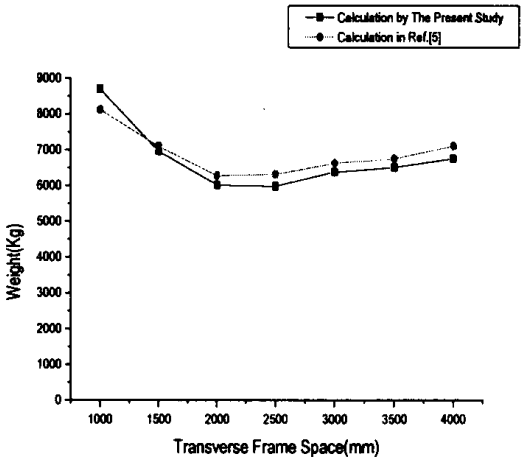

Fig.9 Transverse Frame Space-Weight Relation of Midship Section With Longi Frame Spaces Optimized.

참고문헌

1. 김정제 등, "초고속선 개발", 현대중공업-울산대학교 산학협동 연구보고서, 1994.3.
2. 김정제, 박치모, 이주성, "고속 쌍동여객선 구조최적화에 의한 경량화 설계기법 개발", 울산대-현대중공업 산학협동연구보고서, 1998, 3, 11
3. Moe, J. and Lund, S., "Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphasis on Longitudinal Members of Tankers", RINA Vol.110, 1968
4. 信川壽 , "船体構造의 最適設計", 船의 科學 vol.32, 1979.1.
5. 양영순 등, "유전적 알고리즘에 의한 선체구조물의 이산적 최적설계", 대한조선학회 논문집, 제 31권 4호, 1994, 11.
6. George A. Krieziz, "Standardization in Ship Structural Design", Journal of Ship Production, Voal.7, No.1, Feb. 1991
7. William P. Kral, "Midship Section Design Using a Bilevel Production Cost Optimization Scheme", Journal of Shop Production, vol.7, No.1, Feb.1991