

## 구획 모델링 및 선박 계산 모듈을 이용한 함정의 최적 구획 배치 시스템 개발

노명일<sup>†\*</sup>, 이상욱<sup>\*\*</sup>, 이규열<sup>\*\*\*</sup>

울산대학교 조선해양공학부\*  
(주)이지그래프\*\*

서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학 연구소\*\*\*

Development of an Optimal Compartment Design System of Naval Ships  
Using Compartment Modeling and Ship Calculation Modules

Myung-Il Roh<sup>†\*</sup>, Sang-Uk Lee<sup>\*\*</sup> and Kyu-Yeul Lee<sup>\*\*\*</sup>

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan\*  
EzGRAPH Co., Ltd.\*\*

Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering,  
and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University\*\*\*

### Abstract

Recently, compartment design of a naval ship for efficiently utilizing the limited spaces has become more important. However, the compartment design of the naval ship was not optimized like that of a commercial ship because of a number of design requirements. Thus, the task is being manually performed using the data of parent ships and designers' experiences. To improve this procedure, an optimal compartment design system, which can generate better compartment design result with the satisfaction of various design requirements, is developed in this study. Finally, to evaluate of the applicability of the developed system, it is applied to the compartment design of a 9,000ton missile destroyer(DDG). The result shows that the developed system can yield better result than original design.

※Keywords: Compartment design(구획 배치 설계), Compartment modeling(구획 모델링), Ship calculation(선박 계산), Naval ship(함정)

---

접수일: 2008년 7월 21일, 승인일: 2009년 2월 16일

† 교신저자: miroh@ulsan.ac.kr, 052-259-2165

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 필요성

현대 해군 함정은 시대의 변천에 따라 함정에 탑재되는 무기 체계나 장비의 밀도는 점차 낮아지고, 함정 전체에 대한 비체적은 증가하고 있는 추세이다. 이러한 함정 내부 공간의 증가는 함정의 크기, 배수량 및 비용의 증가를 요구하게 되나 조선 공학적 설계 요구 조건인 속도, 배수량 및 복원성 등의 설계 제약 조건을 고려할 때 함정의 크기를 증가시키는 데에는 제약이 따른다. 따라서 함정의 설계 과정에서 제한된 함정의 공간을 가장 효율적으로 이용하기 위한 함정의 구획 배치 설계의 중요성이 크게 증가하게 되었다. 지금까지 상선과 마찬가지로 함정의 구획 배치 과정은 함정의 특수성에 기인한 요구 조건들이 너무 많아 최적화가 거의 이루어지지 못했다. 즉, 지금까지 함정의 구획 배치는 실적선의 구획 배치 자료를 토대로 하여 설계선에 추가로 반영해야 할 사항만 식별하여 수작업으로 설계선의 구획 배치를 수행하였다. 하지만 최근 컴퓨터의 발달 및 공학 문제의 수학적 모델링 방법에 대한 이해의 증가로 인해 이의 응용 가능 분야가 점차 확대되었으며 함정의 구획 배치 문제에 대해서도 최적화를 수행할 수 있는 단계에 이르렀다.

본 연구에서는 기존에 수작업으로 수행되어 온 함정의 최적 구획 배치 설계를 자동화하기 위해서, 함정의 구획 배치 과정에 이용되는 다양한 설계 요구 조건(구조적 안전성, 복원 성능 등)들을 모두 만족하는 최적의 구획 배치 결과를 산출할 수 있는 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템을 개발하였다. 이를 위해 함정의 최적 구획 배치 문제를 수학적으로 정식화한 후, 이 문제를 풀기 위한 최적화 알고리즘, 구획 모델링 및 선박 계산 모듈 등을 개발하였다. 마지막으로, 개발된 시스템의 효용성을 검증하기 위해 9,000톤급 미사일 구축함(DDG)의 최적 구획 배치 설계 문제에 적용해 보았다.

### 1.2 관련 연구 현황

구획 배치 설계와 관련한 기존의 연구 현황을

살펴보면 다음과 같다. Kim and Lee(1990)는 구획을 표현하기 위한 자료 구조에 관해 연구를 하였고, Kang et al.(1993), Kang and Lee(1994)는 와이어프레임(wireframe) 형태의 선형과 무한 평면과의 교차 계산을 통해 구획을 모델링하는 방법을 제안하였으며, Park and Lee(1999)는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 와이어프레임 모델 기반의 선박 계산 시스템을 개발하였다. Lee et al.(2003)은 격실(facility)간 재화의 이동량과 격실간 인접 관계 등을 고려하여 함정 내 격실들의 최적 위치를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 이 연구는 함정의 격벽(bulkhead)의 위치는 이미 결정되었다고 가정한 후, 함정 내 존재하는 격실들의 최적 위치를 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 구하였다. Lee(2006)는 직관적인 구획 모델링과 신속한 선박 계산을 위한 비다양 다면체 모델링 커널(non-manifold polyhedron modeling kernel) 기반의 구획 배치 설계 시스템을 개발하였다.

이상과 같이 기존 연구들은 대부분 구획을 표현하고 선박 계산을 수행하는 데에 초점을 둔 것이며, 함정의 최적 구획 배치와 관련된 연구는 거의 수행된바 없다.

## 2. 함정의 최적 구획 배치 문제

함정의 구획 배치 설계는 함정 내부의 공간을 다수의 구획으로 분할하는 격벽들의 위치를 정하는 것이다(Fig. 1 참조). 따라서 함정 내부의 격벽들의 각 위치가 최적화 문제의 설계 변수라고 할 수 있다.

함정의 구획 배치 설계시 목적 함수로는 함정 내 무기 및 장비 적재 공간(함정에서 작전 수행을 위해 중요시되는 구획)의 최대화와 동시에 함정의 손상시 안정성 최대를 고려할 수 있다. 여기서, 함정 내부의 공간은 제한되어 있으므로 함정 내 무기 및 장비 적재 공간을 최대화하는 것은 함정의 작전 수행시 상대적으로 중요도가 낮은 공간(연료유(fuel oil), 청수(fresh water), 밸러스트(ballast), 윤활유(lubrication oil) 등 액체 화물의 적재 구획)를 최소화하는 것이라고 볼 수 있다. 또한, 함정의

구획 배치 설계시 고려되어야 하는 설계 제약 조건들로는 연료유, 청수 및 밸러스트 구획 등에 대한 요구 용적, 함정의 구조적 안전성, 각종 규약(rule)에 의한 함정의 손상시 복원 성능 등에 관한 것이 있다. 이상을 고려하면 함정의 최적 구획 배치 문제는 아래와 같이 정리할 수 있다.

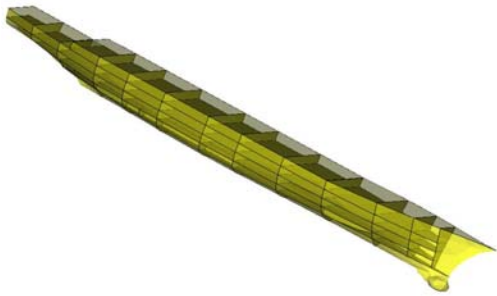


Fig. 1 Compartments and bulkheads of a 9,000ton missile destroyer

설계 변수(design variable)

함정 내 격벽들의 위치

목적 함수(objective function)

함정 내 무기 및 장비 적재 공간의 최대화(= 함정 내 액체 화물 적재 공간의 최소화)와 동시에 함정의 손상시 안정성 최대화

제약 조건(constraints)

- 액체 화물(연료유, 청수, 밸러스트, 윤활유)의 적재 구획에 대한 요구 용적 조건
- 비손상시 구조적 안전성(전단력(shear force), 굽힘 모멘트(bending moment)에 대한 요구 조건
- 규약에 의한 손상시 복원 성능 조건
- 손상시 함정의 자세(흘수(draft), 종경사(trim), 횡경사(heeling))에 관한 요구 조건

위와 같은 함정의 최적 구획 배치 문제를 수학적 식으로 정식화하면 다음과 같다.

설계 변수

$x_1, x_2, \dots, x_n$  ; 함정 내 격벽들의 위치

다목적 함수(multi-objective function)

Minimize

$$F_1 = \sum \{ V_{F.O.T} + V_{F.W.T} + V_{W.B.T} + V_{L.O.T} \} \quad (1)$$

; 함정 내 액체 화물 적재 구획의 용적의 합  
and

Maximize

$$F_2 = \sum_{i=1}^Q GM_i \quad (2)$$

; 함정의 손상시  $GM$ (metacenter height)의 합

제약 조건

$$V_{F.O.T}^{\min} \leq V_{F.O.T} \leq V_{F.O.T}^{\max} \quad (3)$$

$$V_{F.W.T}^{\min} \leq V_{F.W.T} \leq V_{F.W.T}^{\max} \quad (4)$$

$$V_{W.B.T}^{\min} \leq V_{W.B.T} \leq V_{W.B.T}^{\max} \quad (5)$$

$$V_{L.O.T}^{\min} \leq V_{L.O.T} \leq V_{L.O.T}^{\max} \quad (6)$$

$$SF_j \leq SF_j^{\max} \quad (7)$$

$$BM_j \leq BM_j^{\max} \quad (8)$$

$$\phi_{0,i} \leq 15^\circ \quad (9)$$

$$1.4 \leq A_{2,i} / A_{1,i} \quad (10)$$

$$T_i \leq T_i^{\max} \quad (11)$$

$$t_i \leq t_i^{\max} \quad (12)$$

$$\phi_i \leq \phi_i^{\max} \quad (13)$$

여기서,  $n$ 은 함정 내 격벽의 수,  $V_{F.O.T}$ 는 함정 내 연료유 구획 용적의 합,  $V_{F.W.T}$ 는 함정 내 청수 구획 용적의 합,  $V_{W.B.T}$ 는 함정 내 밸러스트 구획 용적의 합,  $V_{L.O.T}$ 는 함정 내 윤활유 구획 용적의 합,  $V_{F.O.T}^{\min}$ 와  $V_{F.O.T}^{\max}$ 는 각각  $V_{F.O.T}$ 의 상·하한값,  $V_{F.W.T}^{\min}$ 와  $V_{F.W.T}^{\max}$ 는 각각  $V_{F.W.T}$ 의 상·하한값,  $V_{W.B.T}^{\min}$ 와  $V_{W.B.T}^{\max}$ 는 각각  $V_{W.B.T}$ 의 상·하한값,  $V_{L.O.T}^{\min}$ 와  $V_{L.O.T}^{\max}$ 는 각각  $V_{L.O.T}$ 의 상·하한값을 나타낸다.  $Q$ 는 선박 계산을 수행할 함정의 손상 상태(damage case)의 총 수,  $GM_i$ 는  $i$ 번째 손상 상태에 대한 메타센터 높이를 나타낸다. 그리고  $SF_j$ 와  $SF_j^{\max}$ 는 각각  $j$ 번째 적재 상태(loading case)에 대한 최대 전단력과 이의 최대 허용 전단력,  $BM_j$ 와  $BM_j^{\max}$ 는 각각  $j$ 번째 적재 상태에 대한 최대 굽힘 모멘트와 이의 최대 허용 굽힘 모멘트를 나타낸다.  $\phi_{0,i}$ 는  $i$ 번째 손상 상태에 대한 초기 횡경사각,  $A_{1,i}$ 와  $A_{2,i}$ 는 각각

$i$ 번째 손상 상태에 대한 복원 아암(righting arm;  $GZ$ ) 곡선과 경사 아암(heeling arm) 곡선으로 구성되는 음의 복원력 구간의 면적과 양의 복원력 구간의 면적을 나타낸다.

마지막으로,  $T_i$ 와  $T_i^{\max}$ 는 각각  $i$ 번째 손상 상태에 대한 평형 흘수와 이의 상한값,  $t_i$ 와  $t_i^{\max}$ 는 각각  $i$ 번째 손상 상태에 대한 중경사값(trim)과 이의 상한값,  $\phi_i$ 와  $\phi_i^{\max}$ 는 각각  $i$ 번째 손상 상태에 대한 횡경사각(heeling angle)과 이의 상한값을 나타낸다. 식 (9), (10)으로 표현되는 함정의 손상시 복원성 요구 조건은 미 해군 함정의 관련 규약(Surko 1994)에 따른 것으로 Fig. 2와 같다.

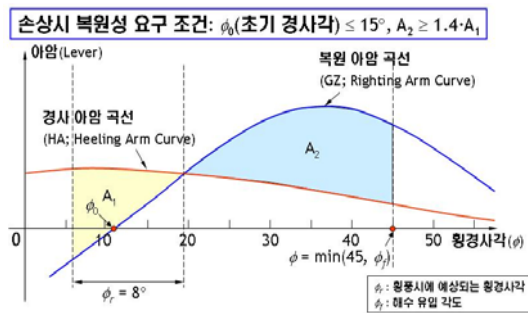


Fig. 2 Damage stability criteria for naval ships of US Navy

한편, 식 (2)에 나타난 목적 함수  $F_2$ (함정의 손상시  $GM$ 의 합)는 최적화 과정에 의해 최대화 되는데 이를 최소화되는 형태로 변환하여 나타내면 다음과 같다.

Minimize

$$F_2' = \sum_{i=1}^Q \{GM^{\max} - GM_i\} \quad (14)$$

여기서,  $GM^{\max}$ 는 손상시  $GM$ 에 대한 최대값으로 본 연구에서는 10.0의 값을 이용하였다.

이와 같이 정식화된 함정의 최적 구획 배치 문제는 두 개의 목적 함수( $F_1, F_2'$ )를 가진 다목적 함수 최적화(multi-objective programming) 문제이다. 식 (1), (14)에 나타난 다목적 함수는 Weighting 방법(Cohon 1978)에 의해 다음과 같

이 단일 목적 함수로 표현할 수 있다.

Minimize

$$F = w_1 \cdot F_1 + w_2 \cdot F_2' \\ = w_1 \cdot \sum \{V_{F.O.T} + V_{F.W.T} + V_{W.B.T} + V_{L.O.T}\} \\ + w_2 \cdot \sum_{i=1}^Q \{GM^{\max} - GM_i\} \quad (15)$$

여기서,  $w_1, w_2$ 는 각각 목적 함수  $F_1, F_2'$ 의 전체 목적 함수  $F$ 에 대한 영향을 나타내는 계수(weight factor)라고 한다. 이 계수들의 값에 따라 최적화 결과가 달라질 수 있으며, 본 연구에서는 최적화 수행시  $F_1$ 과  $F_2'$ 의 전체 목적 함수인  $F$ 에 대한 영향을 균등하게 하기 위해  $w_1 = 0.001, w_2 = 1.0$ 의 값을 이용하였다.

이상과 같이 함정 내부에  $n$ 개의 격벽을 가진 함정의 최적 구획 배치 문제는  $n$ 개의 설계 변수와 11개의 제약 조건<sup>1)</sup>을 가진 단일 함수 최적화 문제로서 정식화될 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 함정 내 무기 및 장비 배치 공간의 최대화와 함정의 손상시 안정성의 최대화라는 두 가지 목적을 동시에 고려하면서 다양한 설계 요구 조건들을 만족하는 최적의 해를 얻도록 함정의 최적 구획 배치 문제를 정식화하였다. 물론, 함정의 선각 강재 중량 최소화, 함정의 종강도와 관련된 굽힘 모멘트 최소화가 또 다른 목적 함수들로서 정식화에 이용될 수 있으나 본 연구에서 개발된 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템은 위와 같은 정식화를 하나의 최적 구획 배치 설계 방법으로 이용하였으며, 정식화가 변경될 경우에도 쉽게 이식이 가능한 특징을 가지고 있다.

1) 위의 정식화에서는 함정의 선박 계산을 위해 각각 1개의 적재 및 손상 상태를 가진 경우를 나타내었으며 다수의 적재 및 손상 상태를 가진 경우 전체 제약 조건의 수는 증가하게 됨. 즉,  $P$ 개의 적재 상태,  $Q$ 개의 손상 상태를 가진 경우 총 (4(액체 화물 구획 용적에 대한 것) +  $P \times 2 + Q \times 5$ )개의 제약 조건을 가짐.

### 3. 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템

#### 3.1 시스템 개요

앞서 설명된 함정의 최적 구획 배치 문제를 풀기 위해 본 연구에서 개발된 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템의 구성도 및 실행 화면은 각각 Fig. 3, 4와 같다. Fig. 3에 나타나 있듯이 본 연구에서 개발된 시스템은 앞서 정식화된

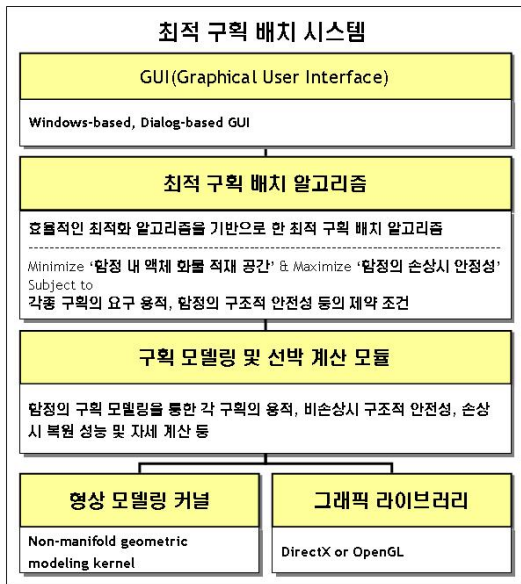


Fig. 3 Configuration of an optimal compartment design system of naval ships

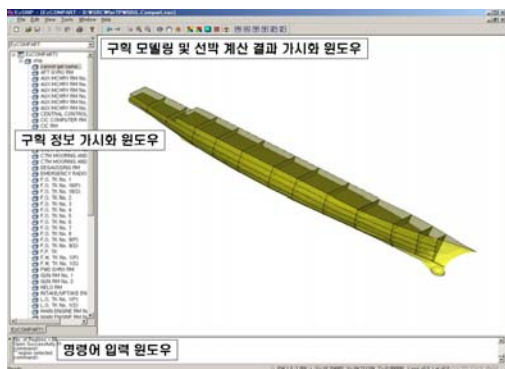


Fig. 4 Screenshot of the optimal compartment design system of a naval ship

최적화 문제를 풀기 위한 최적 구획 배치 알고리즘, 구획 모델링 및 선박 계산 모듈, 형상 모델링 커널, 그래픽 라이브러리, 사용자 인터페이스(Graphical User Interface: GUI)로 구성된다.

#### 3.2 최적 구획 배치 알고리즘

2장에서 정식화된 함정의 최적 구획 배치 문제를 풀기 위해, 본 연구에서는 MFD(method of feasible directions)(Vanderplaats 1984)를 이용하였다. MFD는 국부 최적화 알고리즘(local optimization algorithm)의 하나로서 그 효율성이 입증된 바 있다. 또한 MFD는 빠른 시간 내에 최적해를 산출하는 장점이 있는 반면에 여타 국부 최적화 알고리즘처럼 최적화 수행을 위한 초기 시작점에 따라 국부 최적해(local optimum)를 산출할 수 있다는 단점이 있다.

이러한 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 “Multi-Start Local Optimization”의 개념(Lee and Roh 2001)을 도입하여 최적화를 수행하도록 하였다. “Multi-Start Local Optimization”이란 다수의 초기 시작점으로부터 최적화를 수행한 후 각각의 초기 시작점으로부터 얻어진 국부 최적해들 중에서 가장 좋은 것을 주어진 문제의 전역 최적해(global optimization)라 가정하는 것이다. 물론, 2장에서 정식화된 함정의 최적 구획 배치 문제를 풀기 위해 유전 알고리즘과 같은 전역 최적화 알고리즘(global optimization algorithm)을 이용할 수도 있으나 다수의 격벽을 가진 함정의 최적 구획 배치 문제의 경우 과도한 함수 계산으로 인해 주어진 시간 내에 최적해를 산출하기가 거의 불가능하여 본 연구에서는 MFD에 “Multi-Start Local Optimization” 개념을 도입한 최적 구획 배치 알고리즘을 개발하여 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템에 내장하였다.

#### 3.3 구획 모델링 및 선박 계산 모듈

구획 모델링이란 선주의 요구 사항 중 하나인 화물(함정의 경우 무기 및 장비 등)을 적재하기 위한 요구 용적을 만족하고, 동시에 선박 관련 국제 규약(MARPOL, SOLAS 등)의 요구 사항을 만족하는 화물, 연료 등의 적재 공간을 만들기 위해

선형의 내부를 다수의 구획으로 나누는 작업이다. 그리고 이때 각 구획의 용적과 선박의 비손상 및 손상시 구조적 안전성, 복원성 요구 조건, 평형 자세 등을 계산하는 것이 선박 계산이다. 본 연구에서 개발된 구획 모델링 및 선박 계산 모듈에서의 구획 모델링과 선박 계산에 대한 상세한 내용은 다음과 같다.

(1) 구획 모델링

선형 내부의 공간을 다수의 구획으로 나누는 작업은 복잡한 기하학적인 형상을 설계자가 미리 머릿속에서 모델링하고, 이를 구획 모델링 시스템을 통해 정의해 나가는 과정이다. 본 연구를 통해 개발된 구획 모델링 및 선박 계산 모듈은 함정을 포함한 선박의 구획 모델을 표현하는데 적합한 비다양체(non-manifold) 모델을 이용하여 Fig. 5와 같이 격벽(bulkhead)이 공간(region)을 나누는 실제 설계시의 개념이 그대로 적용되어 직관적인 구획 모델링 기능을 제공한다. 본 구획 모델링 모듈은 설계자가 격벽의 위치만 지정하면 격벽은 비다양체 형상 모델링 커널(non-manifold modeling kernel)이 교차(intersection) 계산을 통해 자동 생성하게 된다. 따라서 격벽의 중복 정의가 불필요하며, 선형 설계에 독립적이며 구조화된 구획 모델링 절차로 선형 설계와 동시 병행으로 구획 모델링이 가능하다.

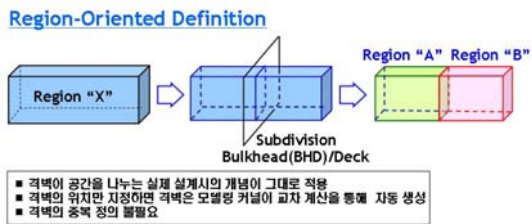


Fig. 5 Compartment modeling method in this study

Fig. 5와 같은 직관적인 구획 모델링 기능은 구획 모델링 및 선박 계산 모듈의 기반인 비다양체 형상 모델링 커널 내의 "Place" 연산에 의해 수행된다. Fig. 6에 나타나 있는 "Place" 연산은 하나

의 공간 또는 구획을 다수의 구획으로 분할하는 기능을 가지고 있다. Fig. 7은 본 연구에서 개발된 구획 모델링 및 선박 계산 모듈의 또 다른 특징인 선형 설계에 독립적이며 구조화된 구획 모델링 절차를 나타내고 있다. 본 모듈에서의 구획 분할 모델과 선형 모델의 독립성은 구획 모델링 작업이 다음의 두 가지 모델링 절차로 이루어지도록 한다.

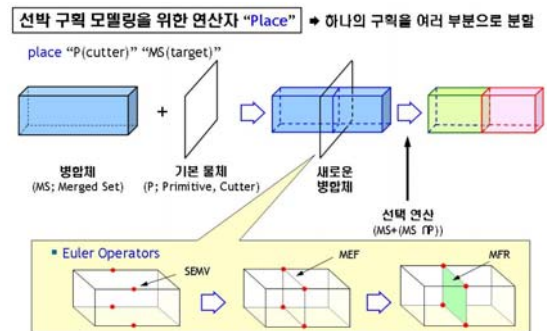


Fig. 6 "Place" operation for compartment modeling

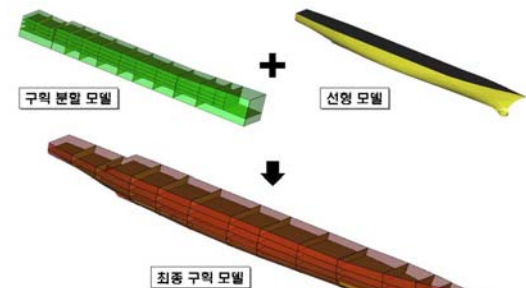


Fig. 7 Procedure of compartment modeling of a naval ship in this study

■ 구획 분할 모델(subdivision bulkhead/deck model) 생성

모든 구획 분할 면의 형상은 기본적인 기하 오브젝트(평면, 직육면체, 여러 다각형을 skinning하여 만든 면 등)를 이용해 정의될 수 있으며, 생성된 구획 분할 면을 선형과 관계없는 직육면체 등의 간단한 모델에 위치시켜 구획 분할 모델을 만든다. 이와 같은 연산을 위해 앞서 설명한

“Place” 연산이 이용된다. 또한 생성된 구획 분할 모델은 특정 선형에 종속되지 않고 독립성을 갖게 되므로 유사 선종에 적용할 수 있는 장점이 있다. 즉, 일단 만들어진 구획 분할 모델을 다른 선형과 결합하여 새로운 구획 모델을 생성해낼 수 있다.

#### ■ 선형 모델로 구획 분할 모델을 “Place”

현재 설계하고자하는 함정의 선형을 앞에서 생성한 구획 분할 모델에 “Place” 연산을 하면 선형면의 바깥쪽 구역이 제외되어 최종 구획 모델이 생성된다. 이때 선형은 다면체(polyhedron)로 이루어진 선형이다.

#### (2) 선박 계산

선박 계산은 선박에 대한 구획 모델링이 완료된 후, 선주의 요구 사항 중 하나인 화물 용적(함정의 경우 무기 및 장비 등)과 기타 국제 규약 등에 제시되어 있는 복원 성능 기준을 만족하도록 구획 모델링이 되었는가를 검증하기 위해 다양한 계산을 수행하는 것이다. 선주의 화물 용적에 대한 요구 사항을 검증하기 위해서는 구획 모델링 작업을 통해 완성된 모든 선박 구획의 용적이 계산되어야 하며, 국제 규약 등에서 요구하는 복원 성능에 대한 기준의 만족 여부를 검토하기 위해서는 여러 적재 상태에 대한 비손상시의 복원 성능(intact stability), 손상시의 복원 성능(damage stability)을 계산하고 국제 규약 등에서 제시하는 기준을 만족하는지 검증할 수 있어야 한다.

본 연구를 통해 개발된 구획 모델링 및 선박 계산 모듈에서는 선체 곡면 부위를 근사적인 평면으로 구성된 비다양체 모델(다면체)을 이용하여 다면체 적분으로 용적을 계산한다(Fig. 8 참조). 이러한 계산 방법은 기존 방식이 2차원 구획 단면 정보로부터 원하는 위치에서의 값을 구하기 위해, 원하는 위치의 전과 후의 값을 보간(interpolation)하여 계산하는 것과 비교해 계산 결과의 신뢰도가 높다. 예컨대, 종경사와 횡경사가 함께 작용하여 기울어져 있는 경우와 같이 선박의 자세를 실제 3차원 형태로 계산을 해야 하는 경우에는 기존 방법으로는 허용 오차의 한계를 넘어서는 오차를 유발할 가능성이 있다. 또한 다면체로 변환하지 않고 곡면을 직접 적분하여 얻은 계산은 보다 정확

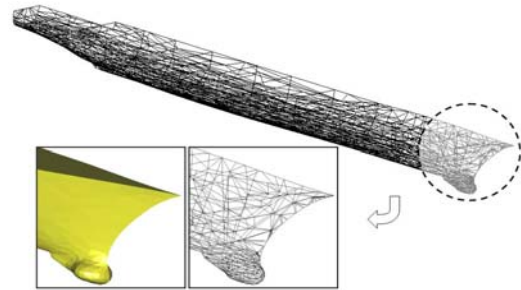


Fig. 8 Polyhedron compartment model of the 9,000ton missile destroyer

한 결과를 얻을 수는 있지만, 설계자가 원하는 정도의 계산 정확도를 다면체 계산으로도 충분히 충족시킬 수 있으며, Fig. 9와 같이 간단한 식으로 용적과, 무게 중심을 구할 수 있는 다면체에 비해, 곡면의 적분 계산은 실제 구현에 있어 복잡하고, 수많은 곡면 간 교차계산이 필요하다는 단점이 있다(Rhim et al. 1999).

#### 3.4 형상 모델링 커널

형상 모델링 커널(geometric modeling kernel)은 구획 모델의 위상 및 형상 정보를 구조적으로 표현하기 위한 도구이다. 함정과 같은 선박의 구획 모델은 기존의 솔리드 모델링 커널(solid modeling kernel)에서 지원되는 다양체(manifold) 요소(점, 선, 면)만 가지고는 표현이 불가능하다. 그것은 솔리드(solid) 모델이 설계가 완성된 후의 최종 결과 형상만을 표현할 수 있기 때문에, 설계 과정 중에 나타나는 불완전한 입체 형상을 표현할 수가 없으며, 설계 과정 중의 설계자의 의도를 포함하지 못하기 때문이다.

따라서 함정의 구획 모델을 임의의 시점에서 와 이어프레임 모델, 곡면 모델 등으로서 효율적으로 표현하기 위해서는 비다양체 요소를 처리할 수 있는 비다양체 형상 모델링 커널(non-manifold geometric modeling kernel)이 필요하며, 본 연구에서는 저자들이 독자적으로 개발한 커널을 이용하였다(Lee 2006). 개발된 비다양체 모델링 커널은 모델의 기하 정보뿐만 아니라 위상 정보까지 저장할 수 있는 비다양체 자료 구조(non-manifold data structure), 모델의 자료 구조

를 생성하거나 수정하는 중요한 도구인 오일러 연산자(Euler operators) 및 모델간의 병합과 선택(merge & selection; 합집합, 교집합, 차집합)을 통해 새로운 모델을 생성하는 불리언 연산자(boolean operators) 등으로 구성이 된다. 또한 이것은 기계 분야에서 많이 이용되고 있는 비다양체 형상 모델링 커널인 ACIS, Parasolid, Open CASCADE 등과는 달리 선박 구획 모델링에 적합한 "Place" 연산을 추가적으로 포함하고 있다.

3.5 그래픽 라이브러리

그래픽 라이브러리는 최적 구획 배치 설계 결과를 디스플레이 상에 가시화 하는 도구이다. 본 연구에서는 마이크로소프트사의 DirectX와 실리콘 그래픽스의 OpenGL을 통합한 그래픽 라이브러리를 개발한 후 이용하였다. 따라서 설계자는 DirectX와 OpenGL 중 하나를 선택하여 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템의 가시화에 이용할 수 있다.

3.6 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스는 설계자가 본 시스템을 이용해 함정의 최적 구획 배치 설계를 수행하는 도구이다. 본 연구에서 개발된 시스템은 설계자로 하여금 간단한 설정을 통해 손쉽게 최적 구획 배치를 수행할 수 있도록 대화 상자 기반(dialog-based)의 사용자 인터페이스를 가지고 있다. 사용자 인터페이스를 통해 설계자는 수행하고자 하는 함정의 최적 구획 배치 문제에 대한 다양한 설정을 할 수 있으며 최적화 결과를 통해 얻어진 최적 구획 배치 설계 결과를 면밀히 검토할 수 있다.

4. 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템을 이용한 9,000톤급 미사일 구축함의 최적 구획 배치 설계 예

4.1 9,000톤급 미사일 구축함의 최적 구획 배치 문제 설정

본 연구에서 개발된 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템의 효율성을 검증하기 위하여

9,000톤급 미사일 구축함의 최적 구획 배치 문제에 적용해 보았다. 최적 구획 배치 문제의 적용 대상 함정으로는 미 해군 미사일 구축함인 Arleigh Burke급 DDG-51을 실적으로 하여 설계된 9,000톤급 미사일 구축함이다(Lee 2002). Table 1은 DDG-51과 본 연구에서의 최적 구획 배치 대상 함정인 9,000톤급 미사일 구축함의 주요 치수를 나타내고 있다.

최적 구획 배치 대상 함정인 9,000톤급 미사일 구축함(이하 기준선)은 Fig. 9에 나타나 있듯이 총 19개의 격벽( $x$  방향 격벽 13개,  $y$  방향 격벽 2개,  $z$  방향 격벽 4개)에 의해 분할된 총 67개의 구획(연료유 구획 12개, 청수 구획 2개, 밸러스트 구획 7개, 유탄유 구획 2개, 무기 및 장비 등의 기타 구획 44개)을 가지고 있다. 따라서 2장에서 서술된 함정의 최적 구획 배치 문제에서 각 격벽의 위치가 설계 변수이므로, 두 개의  $y$  방향

Table 1 Principal particulars of the DDG-51 and the 9,000ton missile destroyer

항목	단위	DDG-51	9,000톤급 미사일 구축함
Displacement	LT	8,369	9,001
LBP	m	142.04	156.51
B	m	17.98	19.82
D	m	12.80	12.84
T	m	6.40	5.80
C <sub>B</sub>	-	0.508	0.508
C <sub>P</sub>	-	0.626	0.626
C <sub>M</sub>	-	0.812	0.812
C <sub>W</sub>	-	0.788	0.788
LCB	% LBP	-0.20	-0.20

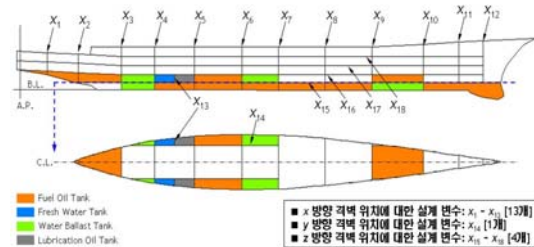


Fig. 9 Design variables for optimal compartment design of the 9,000ton missile destroyer



격벽이 중앙선(center line:  $C.L.$ ,  $y = 0$ )에 대해 대칭이라는 것을 고려하면 기준선에 대한 최적 구획 배치 문제는 총 18개의 설계 변수( $x$  방향 격벽에 대한 설계 변수 13개,  $y$  방향 격벽에 대한 설계 변수 1개,  $z$  방향 격벽에 대한 설계 변수 4개)를 가지게 된다.

본 적용 예제에서는 기준선에 대한 최적 구획 배치의 적재 및 손상 상태로서 각각 두 개의 경우(최대 적재 상태, 최소 운항 상태)를 고려하였다. 따라서 최적화를 위한 총 제약 조건의 수는 18개이다. Table 2는 본 시스템에서의 최적 구획 배치 설계를 위해 이용된 입력값을 나타내고 있다. Table 2에 나타나 있듯이 액체 화물 구획의 경우 상·하함간의 차이를 비교적 크게 주었으며, 구조적 안정성의 평가 기준이 되는 최대 전단력과 최대 굽힘 모멘트에 대해서는 이의 최대 허용값을 기준선의 값보다 작게 주었다. 즉, 기준선 보다 구조적으로 더 안정하면서 목적 함수값을 최소화시킬 수 있는 함정의 최적 구획 배치 설계 결과를 얻고자 하였다.

또한, 식 (15)에 나타난 weight factor( $w_1$ ,  $w_2$ )의 값에 따라 최적화 결과가 달라질 수 있

나, 본 연구에서는 최적화 수행시  $F_1$ 과  $F_2$ '의 전체 목적 함수인  $F$ 에 대한 영향을 균등하게 하기 위해  $w_1 = 0.001$ ,  $w_2 = 1.0$ 의 값을 이용하였다.

**4.2 9,000톤급 미사일 구축함의 최적 구획 배치 설계 결과**

앞서 설정된 기준선의 최적 구획 배치 문제를 본 연구에서 개발된 함정의 최적 구획 배치 설계 시스템을 이용해 최적화를 수행하였다. 앞서 설명한 “Multi-Start Local Optimization” 개념을 이용하여 기준선의 최적 구획 배치 문제에 대한 전역 최적해를 산출하기 위해 50개의 서로 다른 초기 시작점으로부터 최적화를 수행한 후 얻어진 결과 중 가장 좋은 것을 주어진 문제의 전역 최적해라 가정하였다. 최적화 결과를 정리하면 Table 3, 4와 같다. Table 3에서  $x$  방향 격벽 위치를 나타내는  $x_1 \sim x_{13}$ 은 A.P.로부터의 거리를 나타내고,  $y$  방향 격벽 위치를 나타내는  $x_{14}$ 는 중앙선으로부터의 거리를 나타내며,  $z$  방향 격벽 위치를 나타내는  $x_{15} \sim x_{18}$ 은 B.L.로부터의 거리를 나타낸다.

**Table 2** Input data for optimal compartment design of the 9,000ton missile destroyer

항목				단위	입력값	기준선값		
$V_{F.O.T}$	$V_{F.O.T}^{min}$			$m^3$	2,000	2,466		
	$V_{F.O.T}^{max}$				2,500			
$V_{F.W.T}$	$V_{F.W.T}^{min}$			$m^3$	50	87		
	$V_{F.W.T}^{max}$				150			
$V_{W.B.T}$	$V_{W.B.T}^{min}$			$m^3$	500	896		
	$V_{W.B.T}^{max}$				1,000			
$V_{L.O.T}$	$V_{L.O.T}^{min}$			$m^3$	50	100		
	$V_{L.O.T}^{max}$				150			
$SF_1$	$SF_2$	$SF_1^{max}$	$SF_2^{max}$	$kN$	1,430	1,250	1,444	1,291
$BM_1$	$BM_2$	$BM_1^{max}$	$BM_2^{max}$	$kN \cdot m$	64,000	41,000	67,185	41,803
$T_1$	$T_2$	$T_1^{max}$	$T_2^{max}$	$m$	7.00	7.00	6.85	6.81
$t_1$	$t_2$	$t_1^{max}$	$t_2^{max}$	$m$	2.00	2.00	1.35	1.51
$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1^{max}$	$\phi_2^{max}$	$^\circ$	1.00	1.00	0.00	0.04

- 2)  $P = 2$ ,  $Q = 2$ 인 경우이므로
- 4(액체 화물 구획 용적에 대한 것) +  $P \times 2 + Q \times 5$ 로부터 제약 조건은 총 22개가 됨.

**Table 3** Optimization result(objective function and design variables)

항목	단위	기준선 자료	최적화 결과
$F$	-	12.80	12.54
$x_1$	$m$	7.25	7.25
$x_2$	$m$	17.49	17.41
$x_3$	$m$	31.49	31.41
$x_4$	$m$	42.37	42.28
$x_5$	$m$	55.29	55.66
$x_6$	$m$	70.93	71.13
$x_7$	$m$	82.83	81.37
$x_8$	$m$	98.01	96.01
$x_9$	$m$	113.37	111.37
$x_{10}$	$m$	130.17	128.17
$x_{11}$	$m$	141.69	141.87
$x_{12}$	$m$	149.61	147.61
$x_{13}$	$m$	48.83	47.30
$x_{14}$	$m$	4.96	4.91
$x_{15}$	$m$	2.30	2.33
$x_{16}$	$m$	4.60	4.72
$x_{17}$	$m$	7.35	7.35
$x_{18}$	$m$	10.10	10.07

Table 4 Optimization result(constraints)

항목	단위	기준선 자료	최적화 결과	제약 조건			
$V_{F.O.T}$	$m^3$	2,4466	2,435	만족			
$V_{F.W.T}$	$m^3$	87	72	만족			
$V_{W.B.T}$	$m^3$	896	909	만족			
$V_{L.O.T}$	$m^3$	100	108	만족			
합계	$m^3$	3,549	3,523	-			
$SF_1$	$SF_2$	$kN$	1,444	1,291	1,412	1,250	만족
$BM_1$	$BM_2$	$kN\cdot m$	67,185	41,803	63,690	40,609	만족
$\phi_{0,1}$	$\phi_{0,2}$	$^\circ$	0.00	0.02	0.00	0.03	만족
$A_{2,1}/A_{1,1}$	$A_{2,2}/A_{1,2}$	-	40.50	40.49	40.62	40.80	만족
$T_1$	$T_2$	$m$	6.85	6.81	6.87	6.82	만족
$t_1$	$t_2$	$m$	1.35	1.51	1.33	1.44	만족
$\phi_1$	$\phi_2$	$m$	0.00	0.04	0.00	0.05	만족

Fig. 10은 최적 구획 배치 설계 결과 얻어진 9,000톤급 미사일 구축함의 최종 구획 모델을 나타내고 있다. Fig. 11은 기준선과 최적 구획 배치 설계 후의 구획 모델을 비교한 것이다.

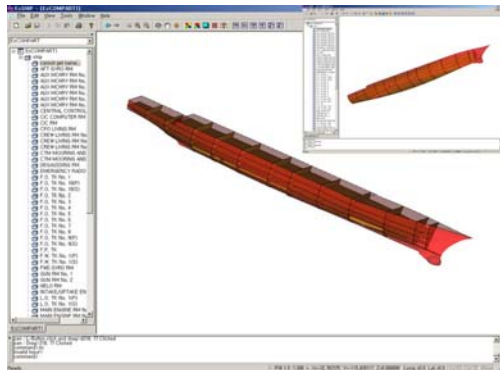


Fig. 10 Optimization result(final compartment model)

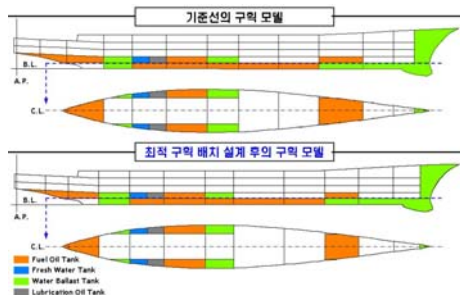


Fig. 11 Comparison of the optimization result with original design

### 5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 그동안 수작업으로 수행되어오던 함정의 구획 배치 설계 작업을 최적화 개념을 도입, 자동화함으로써 단시간 내에 최적 구획 배치 결과를 얻을 수 있는 함정의 최적 구획 배치 프로토타입 시스템을 개발하였다. 이를 위해 함정의 최적 구획 배치 문제를 수학적으로 정식화한 후, 이 문제를 풀기 위한 최적화 알고리즘, 구획 모델링 및 선박 계산 모듈 등을 개발하였다. 마지막으로, 개발된 시스템의 효용성을 검증하기 위해 9,000톤급 미사일 구축함(DDG)의 최적 구획 배치 설계 문제에 적용해 보았다. 그 결과, 비교적 짧은 시간 내에 주어진 설계 요구 조건을 만족하는 최적 구획 배치 설계 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 함정 내 무기 및 장비 배치 공간의 최대화와 함정의 손상시 안정성의 최대화라는 두 가지 목적을 동시에 고려하면서 다양한 설계 요구 조건(구조적 안전성, 복원 성능 등)들을 만족하는 최적의 해를 얻도록 함정의 최적 구획 배치 문제를 정식화하였다. 물론, 본 연구에서 개발된 시스템은 앞서 언급된 함정의 최적 구획 배치 문제의 정식화와는 다른 경우에도 간단하게 이식이 가능한 특징을 가지고 있다. 즉, 함정 설계 전문가에 의해 보다 정밀한 함정의 최적 구획 배치 문제의 정식화가 이루어질 수 있다면, 본 시스템은 이러한 정식화를 기반으로 하여 간단한 재구성 과정을 통해 보다 합리적인 설계 결과를 얻을 수 있을 것이다. 한 예로서, 함정의 선각 강재 중량 최소화, 함정의 종강도와 관련된 굽힘 모멘트 최소화가 또 다른 목적 함수들로서 정식화에 이용될 수 있다.

본 연구에서 개발된 시스템은 선형 설계로부터 선형이 주어졌다는 가정 하에, 선형 내부에 다수의 격벽들을 최적으로 배치함으로써 최적 구획 배치 설계를 수행한다. 하지만 보다 나은 함정의 최적 설계를 위해서는 먼저 저항 및 추진, 운동, 조종 성능 등의 다양한 관점에서 선형에 대한 최적화가 이루어지고 이로부터 얻어진 최적 선형에 대한 최적 구획 배치 설계가 이루어져야 한다. 따라서 본 시스템은 향후 최적 선형 설계와 최적 구획

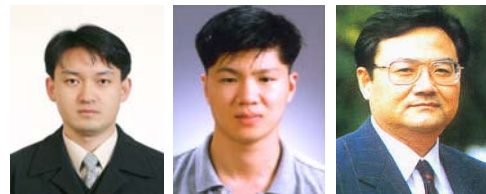
배치 설계를 동시에 수행할 수 있는 함정의 최적 설계 시스템으로써 확장 개발될 예정이다.

### 후 기

이 논문은 2007년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음

### 참 고 문 헌

- Cohon, J.L., 1978, Multiobjective Programming and Planning, Academic Press Inc., New York.
- Kang, W.S. and Lee, K.Y., 1994, "A Study on the Interactive Ship Compartmentation Modeling Technique Using Graphical User Interface," Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 4, pp. 23-31.
- Kang, W.S., Suh, S.W., and Lee, K.Y., 1993, "The Representation Methodology for Object-Oriented Ship Compartmentation," Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 3, pp. 16-28.
- Kim, Y.C. and Lee, K.Y., 1990, "On a Compartment Layout Computer Model and Associated Data Structure," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 27, No. 3, pp. 117-126.
- Lee, K.Y., 2002, Determination of Principal Dimensions of Naval Ships Using Optimization Techniques, Lecture Note for Naval Ships Techniques Training.
- Lee, K.Y., Han, S.N. and Roh, M.I., 2003, "An Improved Genetic Algorithm for Facility Layout Problems Having Inner Structure Walls and Passages," Computers & Operation Research, Vol. 30, No. 1, pp. 117-138.
- Lee, K.Y. and Roh, M.I., 2001, "An Efficient Genetic Algorithm Using Gradient Information for Ship Structural Design Optimization," Journal of Ship Technology Research, Vol. 48, No. 4, pp. 161-170.
- Lee, S.U., 2006, Ship Compartment Modeling and Naval Architectural Calculation Based on a Non-manifold Polyhedron Modeling Kernel, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea.
- Park, S.S. and Lee, K.Y., 1999, "Development of a Ship Calculation Program Based On the Geometric Model," Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 2, pp. 121-134.
- Rhim, J.H., Lee, S.U., Roh, M.I., and Lee, K.Y., 1999, "A Study on Ship Compartment Calculation Using Polyhedron," Proceedings of the Annual Spring Meeting, The Society of Naval Architects of Korea, pp. 103-106.
- Surko, S.W., 1994, "An Assessment of Current Warship Damage Stability Criteria," Naval Engineers Journal, Vol. 106, No. 3, pp. 120-131.
- Vanderplaats, G.N., 1984, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill Inc., New York.



< 노 명 일 > < 이 상 옥 > < 이 규 열 >