대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 50, No. 1, pp. 59-68, February 2013
eISSN:2287-7355, http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2013.50.1.59

유조선의 구획배치 자동화 알고리즘 개발

송하철[1] · 나승수[1,†] · 조두연[1] · 심천식[1] · 이강현[2] · 정솔[2] · 허주호[3] · 정태석[3] · 이철호[3] · 조영천[3] · 김동춘[3]
국립목포대학교 조선공학과[1]
국립목포대학교 대학원 선박해양공학과[2]
STX조선해양 기술연구소[3]

Development of Automated Algorithm for Compartment Arrangement of Oil Tanker

Ha-Cheol Song[1] · Seung-Su Na[1,†] · Du-Yeon Jo[1] · Cheon-Sik Shim[1] · Gang-Hyeon Lee[2] · Sol Jeong[2] · Joo-Ho Heo[3] · Tae-Seok Jeong[3] · Chul-Ho Lee[3] · Young-Chun Jo[3] · Dong-Chun Kim[3]
Dep. of Naval Architecture, Mokpo National University[1]
Graduate School, Dep. of Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University[2]
Technical Institute, STX Offshore & Shipbuilding Co., Ltd.[3]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Nowadays, optimum structural design techniques based on CSR have been developed and applied to the preliminary design stage focused on minimum weight and minimum construction cost of ship structure. Optimum structural design algorithm developed before could minimize weight and cost on fixed compartment arrangement. However, to develop more efficient design technique, a designer needs to combine optimized compartment arrangement with optimized ship structural design because compartment arrangement has a large effect on structural design according to the change of still water bending moment as a consequence of compartment arrangement change. In this study, automated algorithm for compartment arrangement of an oil tanker is developed to apply preliminary structural design. The usefulness of developed algorithm is verified with Aframax oil tanker constructed by STX shipbuilding Co.Ltd.

Keywords : Automated algorithm for compartment arrangement(구획배치 자동화 알고리즘), Aframax oil tanker(Aframax급 유조선), Optimum structural design(최적 구조설계)

1. 서 론

1.1 연구배경

선체 구조 설계에 이용할 수 있는 최적 설계 기법에 관한 연구는 그간 꾸준히 진행되어, 고전적인 구조해석법 (Jang & Na, 1987; Jang & Na, 1996)을 기반으로 한 중앙 횡단면의 최소 중량 설계 기법, 최소 건조비 설계 기법(Shin, et al., 2006) 등을 기본 설계에 응용하고 있으나, 선박의 설계 기간 단축 및 설계기술력의 국제 경쟁력 향상을 위해서는 국제협약과 선급규정을 기반으로 한 선박의 구획배치 자동화 알고리즘을 개발하여 선체 구조 최적설계시스템과 연동시켜야 할 필요성이 점점 증가하고 있다.

지금까지 개발된 최적 구조설계 기법 (Na, 2005; Shin, et al., 2006; Jo, 2010)은 확정된 구획배치를 기반으로 중량이나 건조비를 최소화할 수 있도록 개발이 진행됐으나, 구조설계 단계에서는 구획배치와 횡강도 부재 보강 형식을 제어할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 기본설계는 선형설계, 구획배치, 구조설계 등 여러 단계로 진행되는데 이중 구조설계는 일반적으로 구획이 확정된 다음에 진행하며, 이 단계에서 최적설계 기법을 동원하면 잘 설계된 경험설계 안에 대비하여 중량 또는 건조비 측면에서 약 2~3% 정도의 효과를 거둘 수 있다고 보고되고 있다 (Jang, et al., 1997; Na, 2005; Shin, et al., 2006; Jo, 2010). 하지만 전문가 그룹에서는 구조부재의 최적화 과정에서 선박 구획 배치 변경을 고려할 수 있다면 그 효과는 최소 5% 이상이 될 것이라고 예상하고 있다 (Song, et al., 2012).

이에 따라 본 논문에서는 선체 구조설계 단계로 넘어가기 전에 선행되어야 할 선박의 구획배치를 자동화하는 알고리즘을 개발하였으며, STX조선해양에서 건조한 Aframax급 유조선과 비교하여 그 유용성을 검증하였다. 아울러 개발된 구획배치 자동화 알고리즘의 결과를 구조 최적화 시스템과 연동시켜 도출된 설계 안을 실적선과 비교한 결과, 예상했던 기대 수준에 부합된다는 것을 확인할 수 있었다.

접수일 : 2013년 1월 31일 | 1차 수정일 : 2013년 2월 18일 | 게재확정일 : 2013년 2월 20일
† Corresponding author : ssna@mokpo.ac.kr, 061-450-2761

1.2 국내외 관련 기술의 현황

최근 공통구조규칙(CSR, Common Structural Rules)이 발효됨에 따라 CSR에 기반을 둔 이중선체 유조선과 산적화물선의 효율적인 구조설계 시스템 개발에 관한 연구가 요구되고 있는 바, 국내의 중대형조선소에서도 CSR을 적용한 효율적인 선박설계를 위하여 CSR에 대한 교육은 물론 CSR 기반 설계 연구 과제들을 진행하고 있다 (Korean Register of Shipping, 2009; Jo, 2010; Song, et al., 2012).

최적 구조설계에 대한 국내외 연구는 다음과 같다.

Na, et al. (1985)은 유한요소법을 이용한 횡강도 부재에 대한 최소중량 설계를 시도하였으나 계산시간이 길어지는 단점을 가졌다. 이후 유한요소법을 대체하여 구조 강도를 평가할 수 있도록 기존의 경사처짐법에 굽은 보이론의 외력과 편심을 고려한 일반화된 경사처짐법(GSDM, Generalized Slope Deflection Method)이 연구되었으며, 그 결과 1987년 이후 Jang and Na (1987; 1996)에 의해 선체구조 최적화를 위한 구조강도 평가법으로 정립되었다. 이를 통해 선체 구조 설계에서의 효율적인 설계가 수행될 수 있는 기반이 마련되었다고 평가되는데 이상의 연구들은 선체중량의 최소화를 단일 목적함수로 하였다.

1990년대 중반 이후 재료비(기존의 최소중량설계)와 건조비를 동시에 고려할 수 있는 다목적 함수 최적화 기법이 연구되었는데 이에 대한 연구 동향은 다음과 같다.

다목적함수 최적화기법은 이탈리아의 경제학자인 Pareto가 그 개념을 언급하였으며, 1970년대에 연구가 활발하게 진행되어 그 이론적 배경이 정립되었다. Stadler (1977)가 자연적인 구조물의 형상을 결정하기 위해 Pareto optimality를 구조물의 설계에 도입한 이후, Cohen (1978), Koski and Silvennoinen (1982)과 Hajela and Shin (1990) 등에 의해 많은 연구가 진행되었다.

다목적함수 최적화 방법론에 있어서도 확률론적 탐색기법의 등장에 따라 최적점 탐색시간은 늘어났지만, 전체 최적점에 대한 탐색의 확률이 크게 높아졌다. 이에 대한 대표적인 연구로는 Kim (1994)이 발표한 MOGA(Multi-criteria Optimization by Genetic Algorithm)라는 새로운 알고리즘을 들 수 있다. 이 연구는 단일 목적함수로의 치환에 의해 최적해를 구하던 기존의 다목적 함수 최적화 방법론을 탈피하여, Pareto 정의에 의한 다목적 함수 최적해를 여러 세대에 걸쳐 반복적으로 생성하여 최적해 집합의 형상을 잘 나타내었으나 적은 수의 설계 대상점(population size)에서는 최적해의 형상을 잘 표현할 수 없다는 단점을 가지고 있었다.

다목적함수 최적화를 수행하는 확률론적 탐색기법 중 하나인 진화전략(ES, Evolution Strategies) 기법은 단일 개체 탐색법과 다 개체 탐색법의 특징을 모두 갖춘 독특한 형태의 방법이다.

Jang, et al. (1997)은 확률론적 탐색범의 장점을 유지하면서 계산시간을 줄이기 위해 ES의 $(\mu+\lambda)$방법을 개선한 다목적 함수 최적화 알고리즘을 제시하였다. 이 방법은 탐색의 시작은 $(\mu+\lambda)$로 하고, 전체 최소점 부근에서는 (1+1)로 전환하는 특성을 가지고 있다. Knowles (1999)은 (1+1)ES를 이용한 PAES(Pareto Archived Evolution Strategies) 알고리즘을 개발하여 국부탐색 방법으로 Pareto 최적해 집합을 구하였고, Stidsen, et al. (1999)은 돌연변이 매개변수(mutation parameter)에 대한 연구를 수행하여 문제의 특성에 따른 돌연변이 매개변수의 필요성을 강조하였고 포물선 연산자(parabolic operator)를 이용해 ES의 수렴성을 강화시켰다. Na (2005)와 Jo (2010)는 직접탐색법과 확률론적 탐색법의 장점을 결합한 Pareto 기반 다목적함수 최적화기법을 개발하여 탐색방향, 설계치수의 상하한 값을 활용한 탐색폭, 탐색폭과 연계된 수렴도 및 무작위 탐색법을 활용하여 설계 전영역에 걸쳐 전체 최적점의 탐색을 용이하게 하였다.

그러나 이러한 최적화 기법들은 대부분 선체 중앙횡단면을 중심으로 한 구조 최적화에 대한 연구로서 선체 설계에 많은 영향을 미칠 것으로 예상되는 구획배치 최적화에 대한 연구는 매우 드문 실정인데 그간의 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다..

구획배치 설계에 관련 연구는 Lee and Lee (1996)가 초기설계 단계에서 구획배치 설계기준과 지식베이스화 하여 설계 시 시행착오를 줄일 수 있는 설계지원 방법을 제시하였고, Byun, et al. (1997)은 선박 설계의 초기 단계에서 선주의 요구조건과 각종 규종 및 제한조건(분리평형수 요건)을 바탕으로 화물창 용적, 밸러스트 용적, 복원성 및 트림조건에 만족하는 구획배치를 결정하기 위해서 외부 선박계산 프로그램인 SIKOB를 호출하여 결과값을 확인하는 구획배치를 지원 시스템을 구축하였다. 그러나 이 시스템은 선박의 길이방향(선수/미부와 중앙평행부)의 분할만이 가능하여 학문적 성과는 있었으나 실 설계에 적용하는 것은 어려웠다. 이후 함정의 구조 내벽과 접근 통로가 있는 설비 배치 문제(FLP, Facility Layout Problem)를 해결하기 격벽 배치를 수행하는 유전자 알고리즘 (Han & Lee, 2000; Han, et al., 2001)을 개발하였으나 내벽과 접근통로 인근의 문제에 국한하였고, 전체 선박의 배치 문제는 다루지 않았다.

이들을 종합하여 볼 때 그간의 구획배치 연구는 선박의 국부적인 배치 문제를 이상화하여 다루거나, 전면적인 실 설계 적용이 아닌 학문적인 입장에서 구획배치 자동화의 가능성을 타진하는 수준에서 연구가 진행되었다고 할 수 있다.

이에 따라 본 논문에서는 구획배치와 구조설계를 통합한 선박의 최적설계시스템 구축에 필요한 기반 연구로, 全船 구획배치 자동화 알고리즘에 대한 연구 결과를 기술한다.

2. 연구내용 및 범위

2.1 대상 선박

본 연구의 대상이 되는 선박은 STX조선해양에서 설계, 건조한 115k Aframax급 유조선으로 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Principal dimensions of 115k Aframax oil tanker

Item		Dimension (m)
Length over all	L_{OA}	249.99
Length between perpendicular	L_{BP}	239.00
Moulded breadth	B	44.0
Moulded depth	D	21.00
Design draft /	T	13.60
Scantling draft	T_S	14.90

2.2 연구 내용

본 연구의 흐름도는 Fig. 1과 같다.

선체의 주요 요목과 선형설계에서 결정된 선형을 바탕으로 자동화 알고리즘을 통해 구획배치를 수행하고, 생성된 구획배치 결과가 설계상 요구되는 용적을 만족했을 때 실적선의 결과와 비교하여 그 유용성을 검증하였으며, 실적선 대비 개선된 구획배치의 결과가 선체 구조설계에 미치는 영향을 평가하기 위해 최적 구조설계를 수행하여 그 결과를 고찰하였다.

구획배치 자동화 알고리즘은 유조선에 관한 공통구조규칙(CSR)은 물론 해사관련 국제협약이 요구하는 규정을 만족하도록 하였으며, 이후에 수행하는 최적 구조설계는 Na (2005)가 개발한 다목적함수 최적 구조설계 알고리즘을 사용하였다.

배치된 구획을 토대로 한 용적의 계산과 각종 재화상태에 따른 선박계산은 상용 프로그램(Ez-COMPART)를 본 연구에서 개발한 주 프로그램에서 호출하여 수행하도록 연동시켰다.

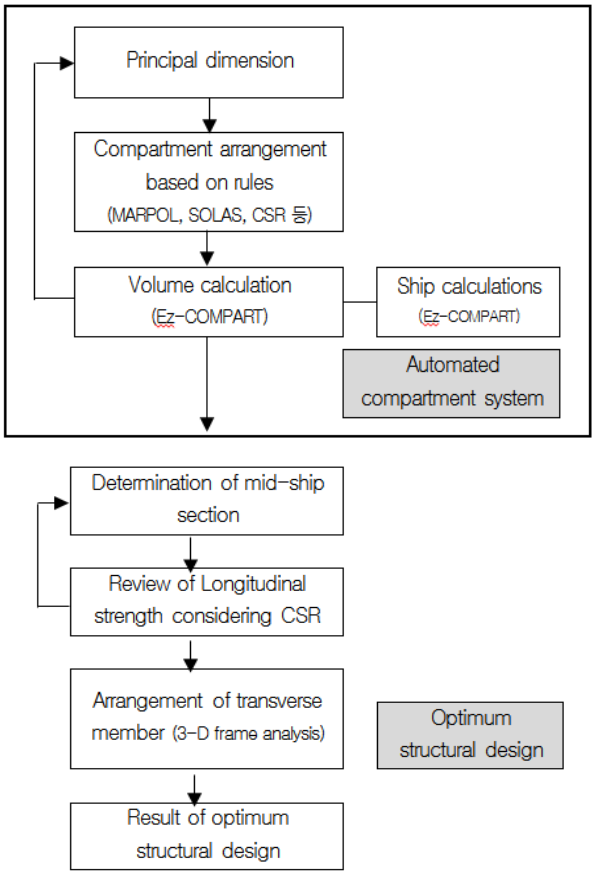

Fig. 1 Automated compartment arrangement during ship design

3. 구획배치 관련 규정의 검토

유조선의 구획배치에 필요한 규정은 해양오염방지협약(MARPOL, Marine Pollution Treaty), 해상인명안전협약(SOLAS, International Convention for the Safety of Life at Sea) 및 공통구조규칙(CSR) 등이 있다. MARPOL의 경우 해상 오염 방지를 위한 규정이 주를 이루고 있으며, SOLAS의 경우 해상에서의 안전과 인명 구조에 대한 내용으로 구획배치와 연관된 부분이 많다. CSR의 경우는 MARPOL 및 SOLAS의 내용과 대부분 일치되는 내용을 포함하고 있어 구획배치에 고려되는 규정은 크게 MARPOL과 SOLAS 두 규정이 주가 된다고 볼 수 있다. Table 2는 상기한 구획배치에 관련된 규정을 정리하고 있다.

Table 2 Rules and regulations for compartment arrangement for oil tanker

Rules	content	Application requirements
MARPOL ANNEX I REG. 12A	Oil fuel tank protection	All ships delivered on or after 1 August 2010
MARPOL ANNEX I REG. 18, CSR Sec.5 3.1.2	Segregated ballast tank	Oil tankers delivered after 1 June 1982
MARPOL ANNEX I Reg. 19, CSR Sec.5 3	Double hull and double bottom	Oil tankers delivered on or after 6 July 1996
MARPOL ANNEX I REG. 22	Pump-room bottom protection	Oil tankers delivered on or after 1 January 2007
MARPOL ANNEX I REG. 23	Accidental oil outflow performance	Oil tankers delivered on or after 1 January 2010
MARPOL ANNEX I REG. 29	Slop tank	All oil tankers
SOLAS, Ch. II-1, Reg. 12, CSR Sec.5 2.2	Collision bulkhead	All ships
SOLAS Chap. II-2 Reg.4	Cofferdam	All ships
CSR Sec.5 2.3	After peak tank	All ships

4. 구획배치 자동화 알고리즘

4.1 구획배치 자동화 전략

기본설계 단계에서 주어진 선박의 제원을 가지고 화물창 용적을 보다 크게 확보할 수 있다면, 선박의 주요치수(특히 길이)를 줄일 수 있어 정수 중 굽힘 모멘트를 감소시킬 수 있거나, 주요치수를 그대로 유지할 경우 재화 중량을 증가시킬 수 있다.

두 가지 모두 선박의 최적 설계에 보다 긍정적인 효과를 기대할 수 있기 때문에 구획배치를 자동화하는 전략으로 규정이 허락하는 범위 내에서 중앙화물창 용적을 극대화하여 확보할 수 있도록 선수미부를 배치하는 알고리즘을 구성하였다. Fig. 2는 구획배치 자동화 알고리즘을 나타내는데 먼저 선미부와 선수부의 구

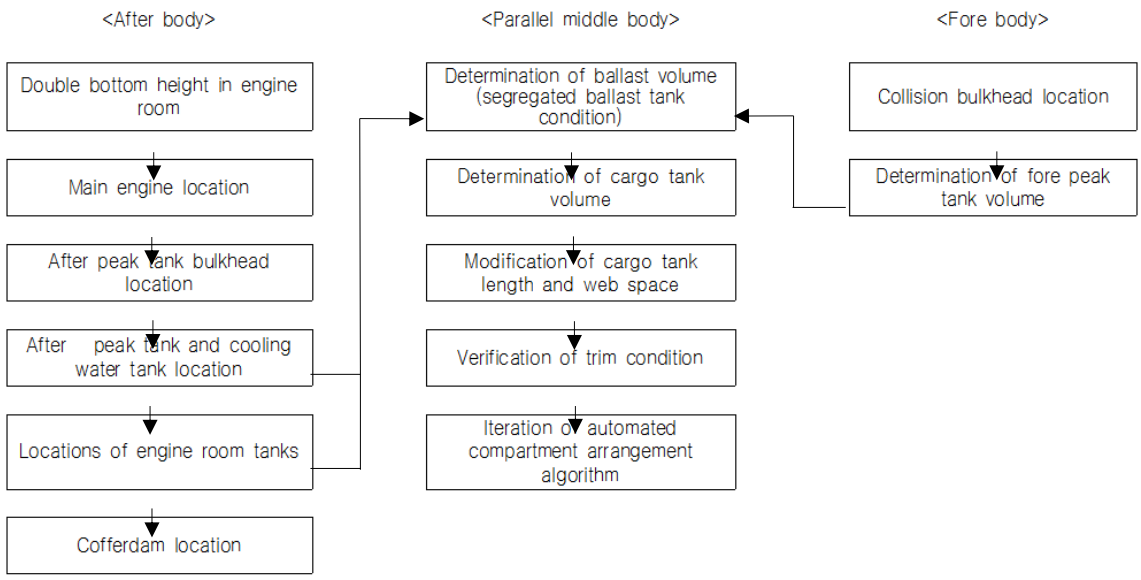

Fig. 2 Automated compartment arrangement algorithm

획배치를 선행하고 나머지 부분을 중앙화물창 구획으로 설정하는 단계를 거치게 된다.

구획 배치에 있어 용적의 계산은 선박계산용 상용 프로그램인 Ez-COMPART를 주 프로그램에서 호출하여 계산하였다.

4.2 구획배치 변수

구획배치에 필요한 변수로는 각종 격벽의 위치, 이중저 높이, 이중선체 폭 및 호퍼 경사각 등이 있다.

이중저 높이와 이중선체의 폭은 MARPOL ANNEX I REG. 19에서 이중저/이중선체 요건의 최소 높이(2m)부터 0.1m씩 점진적으로 동시에 변경하였고, 호퍼 경사각은 이중저/이중선체 값이 점진적으로 증가할 때마다, 45°~50°사이에서 1°씩 변화시켰다.

4.3 제한조건

설계 대상인 유조선의 구획은 선주가 요구한 재화중량(DWT)을 만족하면서 분리평형수 조건(S.B.T condition, Segregated Ballast Tank condition)의 프로펠러 심도(propeller immersion) 및 선수미부 조건을 만족시키도록 제한되었다.

4.4 선미부 자동화 알고리즘

본 알고리즘에서는 선미부 구획배치를 가장 선행하게 되는데, 아래와 같은 선미부 결정 알고리즘을 토대로 각 구획을 순차적으로 정의하였다.

4.4.1 주 기관의 위치 결정

선형개발을 통해 완성된 선미 형상을 토대로 선미관(stern tube)의 위치를 찾고 그 높이에 맞게 기관실의 이중저 높이를 결정한다. 이 후, 엔진의 좌우 유지보수를 고려한 폭, 선미 쪽에 위치하는 선미탱크(A.P.T., After Peak Tank), 냉각용 청수 탱크(C.W.T., Cooling Water Tank), 각종 발전기 등의 설치와 유지보수를 위한 통로를 고려하여 주 기관의 길이, 방향 및 위치를 결정하였다.

4.4.2 선미 격벽의 위치 결정

선미 격벽(A.P.T. BHD, After Peak Tank Bulkhead)은 선미탱크 및 냉각용 청수 탱크의 용적을 충분히 확보할 수 있는 위치로 결정한다. 이 위치는 실적선의 값으로 하였다.

4.4.3 선미 탱크, 냉각용 청수 탱크 용적 결정

선미 탱크는 선박의 트림 조절 및 밸러스트 용도로 설치하고 냉각용 청수 탱크는 프로펠러 축에서 발생하는 열을 식히기 위해 설치한다. 이들 용적은 실적선의 용적을 참고하여 결정하였다.

4.4.4 펌프실의 정의

펌프실(pump room)은 기관실과 화물유 탱크 사이에 배치한다. 보통 펌프실에는 화물유 펌프 3대, 밸러스트 펌프가 1~2대 정도 설치되지만, 이들의 재원은 선박의 크기에 따라 달라질 수 있기 때문에 구획배치 자동화 알고리즘 수행 전 사용자가 펌프의 개수, 파이프 배치, 유지보수 공간 확보 등을 고려하여 정해줄 수 있도록 하였다.

4.4.5 연료유 탱크의 위치 및 용적 결정

선박의 항해에 필요한 연료유 탱크(H.F.O.T., Heavy Fuel Oil

Tank) 위치 결정 시에는 유지보수를 위한 공간과 선측을 손상으로부터 보호하기 위한 일정 거리를 확보하여야 한다. 연료유 탱크의 위치가 결정되면 항해 거리를 감안하여 연료유 적정 용적을 계산하고, 이를 확보하기 위한 탱크 길이와 경사각 등의 변수를 기초로 연료유 탱크의 용적을 결정하게 된다.

4.6 선수부 자동화 알고리즘

4.6.1 충돌격벽의 위치 결정

충돌 격벽(collision bulkhead)은 화물 탱크의 용적을 최대로 확보하기 위하여 SOLAS에서 요구하는 최소 길이로 결정하였다.

4.6.2 선수탱크의 용적 결정

선수 탱크(F.P.T., Fore Peak Tank)는 선미 탱크와 마찬가지로 선박의 트림조절을 위한 밸러스트 탱크이며, 프로펠러 심도(propeller inspection) 조건에 만족하는 용적을 확보하여야 한다.

4.7 중앙 화물창 자동화 알고리즘

4.7.1 중앙 화물창 구역의 밸러스트 용적 결정

중앙 화물창의 화물유와 밸러스트 탱크의 용적은 MARPOL의 분리평형수 조건을 고려한다. 분리평형수 조건은 선미의 프로펠러가 100% 이상 잠기는 것을 요구한다. 초기 설계자가 입력하는 경하중량(L.W.T., Light Weight)과 선수미부 탱크 용적을 근거로 MARPOL의 분리평형수 조건에 만족하는 중앙화물창 밸러스트 용적을 계산한다.

4.7.2 중앙 화물창 구역의 화물유 탱크 용적 결정

화물유 탱크 용적은 밸러스트 탱크로 정의된 구획을 제외한 나머지 부분으로 한다. 따라서 이중저 높이와 이중 선체 폭을 0m부터 점점 증가시키면서 100% 프로펠러 심도(propeller immersion)를 만족하는 위치로 결정하게 된다. 하지만 이렇게 계산하면 계산량이 방대해질 뿐 아니라 계산 시간도 오래 걸리기 때문에 일반적인 선박의 이중저 높이와 이중선체 폭이 2m 이상임을 감안하여 계산의 시작점을 2m로 정하였다. 그리고 호퍼의 경사각은 이중저 높이와 이중 선체 폭이 바뀔 때마다 45°~50 °로 순차적으로 바꿔가며 용적계산이 가능하도록 하였다.

4.7.3 화물창 길이와 웨브 간격 조절

선수부의 충돌 격벽의 위치가 화물창 용적을 최대로 확보하기 위해 선박의 전방으로 이동하게 됨에 따라, 슬롭 탱크(slop tank)의 위치 및 횡격벽의 위치를 생산성을 감안한 적정 위치로 재설정하고 구획배치 알고리즘을 재수행한다.

4.7.4 중앙 화물창 구역의 형상 결정과 트림 조건 확인

중앙 화물창 구역의 형상이 결정되면 각종 적재 상태에 따른 트림을 계산한다.

5. 구획배치 자동화 프로그램의 구성

상기한 구획배치 결정 알고리즘을 토대로 구성된 자동화 프로그램의 주요구성은 Table 3과 같다. Table 3은 구획배치 자동화 프로그램의 기본 구조와 모듈 별 주요 기능을 나타낸다.

Table 3 Major functions of automated compartment arrangement system

Module	Functions
Input	* Input of principal dimension (L_{BP},B,D,T,etc.)andpropellerinformation * Hull form data for ship calculation * Designation of backup folder * Cargo tank cleaning system type to determine slop tank volume
Ship calculation	* File generation for ship calculation using Ez-COMPART
Rule calculation	* Double bottom height and double side breadth * Pump room protection * Slop tank * Collision bulkhead
Automated compartment arrangement	* Changes of design variables (double bottom height, double side breadth, hopper angle) * Slop tank location * Modification of cargo tank length and web space considering fabrication guidelines * Output backup of automated compartment arrangement

6. 구획배치 결과

6.1 용적 계산 정도 검증 (design ship-1)

개발된 구획배치 자동화 프로그램에서 Ez-COMPART 시스템을 호출하여 계산하는 각종 구획에 대한 용적 계산의 정확성을 확인하기 위하여, 선수미부를 고정하고 실적선과 동일한 위치에 주요 부재들을 위치시킨 후(이중저 높이 2.3m, 이중선체 폭 2.3m, 호퍼 경사각 48°) 개발된 구획배치 알고리즘으로부터 도출된 탱크 용적을 비교한 결과 실적선과 거의 일치하는 결과를 얻어 구획배치 자동화 프로그램과 Ez-COMPART의 연동이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다(Table 4).

Table 4 Tank volume (design ship-1)

Compartment	Existing ship (A) (m^3)	Design ship (B) (m^3)	Difference[1] (%)
Cargo tank	131,557.3	131,593.7	0.03
Ballast tank	41,368.9	41,335.2	-0.08
Diesel oil tank	254.1	253.6	-0.20
Fresh water tank	459.1	459.1	0.00
Heavy fuel oil tank	2,921.7	2,982.2	2.10
Lubricating oil tank	176.5	176.5	0.00
Miscellaneous tank	151.3	151.3	0.00

1)(B-A)/A*100 (%)

6.2 화물창 용적을 극대화한 구획배치 결과 (design ship -2)

본 연구에서 개발된 구획배치 자동화 알고리즘은 각종 규정을 만족하면서 화물창 용적을 극대화하는 전략을 담고 있는 바, 이를 수행한 결과 Table 5에서와 같이 주요 부재들의 위치 및 간격이 변경되었다. Table 5의 결과를 검토하면 다음과 같다.

기관실 격벽(engine room bulkhead)의 위치는 변동이 거의 없었고, 충돌 격벽의 위치는 SOLAS 규정을 만족하는 최소 위치에 배치되었기 때문에 선미 수선(A.P., After Perpendicular)으로부터 228.54m 위치에서 231.80m로 변경되었다.

이와 같이 충돌 격벽 위치가 조정된 결과 중앙평행부의 길이가 길어져 화물창 한 개의 길이가 30.24m에서 30.76m로 증가하였다. 또한 화물창 길이가 길어짐에 따라 화물창 길이와 연동되어 결정되는 슬롭 탱크의 간격도 4.70m에서 4.84m로 증가하였다.

Table 6는 실적선과 개발된 구획배치 자동화 알고리즘의 결과를 비교하고 있다. 결과로써 도출된 용적을 상호 비교한 결과 개발된 알고리즘으로 결정된 화물창의 용적이 실적선 대비 1.22% 정도 증가했음을 확인하였다. 이를 보다 상세히 분석해 보면 선박의 주요 치수를 동일하게 유지할 경우 재화 중량을 1,355ton 정도 늘릴 수 있으며, 주요 치수를 변경할 경우 선박의 길이를 약 3m 정도 감소시킬 수 있는 것으로 파악되어 현업의 실 설계에 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

또한 두 가지 구획배치 설계안에 대해 선체에 발생하는 굽힘 모멘트를 산정한 결과 자동화 알고리즘으로부터 도출된 구획배치에 대한 굽힘 모멘트가 실적선보다 작음을 확인함으로써(Table 7) 본 연구 결과의 유용성을 밝힐 수 있었다. Table에서 BHD, D/B 및 D/S는 각각 격벽(bulkhead), 이중저(double bottom) 및 이중선체(double side)를 의미한다.

Table 5 Main bulkhead location after determining compartment (unit; m)

Item	Existing ship		Design ship	
	Location from A.P	Spacing between BHD.	Location from A.P	Spacing between BHD.
Engine room BHD.	42.40	-	42.40	-
Slop tank BHD.	47.10	4.70	47.24	4.84
No. 5 BHD.	77.34	30.24	78.00	30.76
No. 4 BHD.	107.58	30.24	108.76	30.76
No. 3 BHD.	137.82	30.24	139.52	30.76
No. 2 BHD.	168.06	30.24	170.28	30.76
No. 1 BHD.	198.30	30.24	201.04	30.76
Collision BHD.	228.54	30.24	231.80	30.76

Table 6 Comparison of volume

Item	Existing ship (A) (m^3)	Design ship (B) (m^3)	Difference[2] (%)
Cargo tank	131,557.3	133,156.2	1.22
Ballast tank	41,368.9	40,785.2	-1.41
Fresh water tank	459.1	459.0	-0.04
Diesel oil tank	254.1	305.5	19.76
Heavy fuel oil tank	2921.7	2921.7	0.00
Lubricating oil tank	176.5	177.5	0.68

2)(B-A)/A*100 (%)

Table 7 Comparison of S.W.B.M. (Still Water Bending Moment)

Case	D/B height (m)	D/S breadth (m)	S.W.B.M hogging (ton-m)	S.W.B.M sagging (ton-m)
Existing ship	2.39	2.2	343,538	-221,775
Design ship	2.3	2.3	342,862	-220,759

7. Pareto 최적점 기반의 구조설계 결과

Pareto 최적점 기반 다목적함수 최적화 기법(Pareto optimal based multi-objective function method)은 직접 탐색법과 확률론적 탐색법의 장점을 결합하여 개발된 최적화 기법으로 Pareto

최적점 기반의 탐색방향, 설계치수의 상하한 값을 활용한 탐색폭, 탐색폭과 연계된 수렴도 및 무작위 탐색법을 활용하여 설계 전 영역에 걸쳐 탐색하도록 함으로써 전체 최적점을 용이하게 찾도록 하였다 (Na, 2005).

7.1 설계변수

구조 최적화를 위한 설계변수는 Fig. 3와 같이 설정하였다. 그림에서 설계 변수들은 다음과 같다.

X1: 갑판 두께
X2, X3, X4: 종통재 간격
X5: 웨브 간격
X6~ X13: 웨브 높이 및 두께

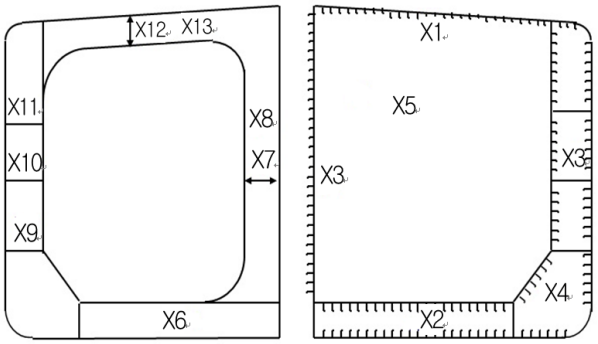

Fig. 3 Design variables

7.2 제한조건

설계 제한 조건은 국부강도, 종강도, 횡강도로 나누어 다음 식 (1)과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} G(1) &\geq (T_D)_C/(T_D)_R - 1 (\text{국부강도}) \\ G(2) &\geq (S_B)_C/(S_B)_R - 1 (\text{종강도}) \\ G(3) &\geq (S_D)_C/(S_D)_R - 1 (\text{종강도}) \\ G(4) &\geq Z_R/Z - 1 (\text{횡강도}) \\ G(5) &\geq A_R/A - 1 (\text{횡강도}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, G(i): 설계 제한 조건 함수
T_D:최소 갑판 두께
S_B,S_D:이중저 및 갑판에서의 단면 계수
$(\ )_C$:두께 및 단면계수
$(\ )_R$:요구된 두께 및 단면계수
Z: 단면 계수
Z_R:요구된 단면계수
A: 전단면적
A_R:요구된 전단면적

7.3 구조 중량 추정식(structural weight estimation, F1)

최적화 알고리즘에서 종부재, 횡부재, 횡격벽, 선수부, 선미부의 중량을 구하는 식은 (2)와 같다.

$$F1 = W_L + W_T + W_B + W_F + W_A \quad (2)$$

여기서, $W_L=W_l \times L_h \times \{0.4+0.6(3+C_B)/4\}$
$W_T=(W_{tc} \times N_{tc}+W_{tw} \times N_{tw}) \times \{0.4+0.6(3+C_B)/4\}$
$W_B=W_b \times N_b$
$W_F=160 \times (L_f \times B \times D \times C_B/1000)^{0.728}$
$W_A=530 \times (L_a \times B \times D \times C_B/1000)^{0.469}$
W_L=종부재 중량
W_T=횡부재 중량
W_B=횡격벽 중량
W_F=선수부 중량
W_A=선미부 중량
W_l =단위 길이당 종부재 중량
W_{tc},W_{tw}=단위 길이당 화물창 및 윙탱크 중량
W_b=단위 길이당 횡격벽 중량
L_h,L_f,L_a=화물창 길이, 선수부 길이, 선미부 길이
N_{tc},N_{tw}=화물창과 윙탱크의 개수
N_b=횡격벽 개수
C_B=방형계수

7.4 건조비 추정식(construction cost estimation, F2)

건조비 F2는 재료비와 인건비의 합으로 나타낼 수 있는데 각각의 상세한 계산과정은 다음과 같다.

7.4.1 재료비(material cost) 추정

재료비는 재질에 따른 구조 중량에 재료단가를 곱한 값으로서 그 식은 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{재료비}(\$) \\ &= \text{구조중량}(Ton) \times \text{재료단가}(\$/Ton) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 구조중량: 재질별 구조부재의 중량
재료단가: 재질별 단가
- Mild steel: $660/Ton
- HT32: $690/Ton
- HT36: $710/Ton

7.4.2 인건비(labor cost) 추정

인건비는 취부장과 용접장을 고려한 조립장을 이용하였다. 횡

강도 부재 및 횡격벽 부재의 인건비 추정은 종강도 부재와 횡강도 부재가 만나는 조립장을 고려하였으며, 횡격벽 부재에 붙어 있는 수직 보강재에 대한 조립장도 고려하였다.

인건비는 조립공수에 노임단가를 곱한 값으로서 식 (4)와 같이 구하였다. 여기서, 노임단가는 $50/M·H를, 조립단위공수는 필릿 용접인 경우 2.0 M·H/m, 맞대기 용접인 경우 3.0 M·H/m를 사용하였다.

$$\text{인건비}(\$) = \text{조립공사}(M{\cdot}H) \times \text{노임단가}(\$/M{\cdot}H) \quad (4)$$

여기서, 조립공수(M·H) = 조립장(m) × 조립단위공수(M·H/m)

7.5 실적선과의 구조 설계 결과 비교

구조설계를 상호 비교하는 설계안은 Table 8에 나와 있는 대로 실적선(existing ship) 구획배치 안과 구획배치 자동화 결과에 대한 안(design ship)으로 하였다. 실적선은 STX 조선해양에서 건조되어 운행 중인 선박의 구획배치이며, 구획배치 자동화 결과에 대한 안은 화물창 용적을 극대화하는 안을 말한다.

Table 8 Design case

Case	D/B height (m)	D/S breadth (m)	S.W.B.M Hogging (ton-m)	S.W.B.M Sagging (ton-m)
Existing ship	2.39	2.2	343,538	-221,775
Design ship	2.3	2.3	342,862	-220,759

7.6 최적 구조설계 결과

Table 9는 실적선 구획배치 안과 구획배치 자동화 설계 안을 토대로 최소중량, 최소 건조비 중 하나만을 단일 목적함수로 갖고 실행한 최적 구조설계 결과를 비교하고 있다. 최소 중량설계를 수행한 결과 개발된 알고리즘으로부터 도출된 안이 실적선 안보다 중량을 361ton 정도 적게 설계할 수 있는 것으로 나타났고, 최소 건조비 설계를 수행하면 건조비를 40만$ 정도 감소시킬 수 있을 것으로 파악되어, 개발된 구획배치 자동화 알고리즘을 통한 구조설계가 보다 우수한 설계가 됨을 검증하였다. 여기서 Table 9의 설계변수는 Fig. 3의 정의와 동일하다.

Fig. 4는 구획배치 자동화 결과를 토대로 Pareto 최적점 기반 다목적함수 최적 구조설계를 수행한 최적해의 분포와 실적선 구획배치에 기반을 둔 최적 구조설계를 수행한 결과(existing ship)를 비교하여 보여주고 있다. 이에 나타난 바와 같이 구획배치 자동화를 토대로 한 구조 최적설계의 최적점 분포가 실적선보다 좋아진 것을 알 수 있었다.

여기서 Single이란 최소중량 또는 최소 건조비 하나만을 목적함수로 갖고 실행했을 때의 결과이며, PS(Pareto Strategy)는 중량와 건조비 두 가지를 다목적함수로 하여 실행했을 때의 결과로써, 다목적함수 최적화의 결과는 최소 중량과 최소 건조비 양 극단에서 단일목적함수 최적화 결과와 동일한 값을 갖는 것을 확인하였다. Table 9와 Fig. 4에서 M$는 10^6dollars를 의미한다.

Table 9 Optimum structural design results

Objective / Function / Design variables	Minimum weight(ton)		Minimum cost(M$)	
	Existing ship	Design ship	Existing ship	Design ship
X1 (mm)	18.0	22.5	18.0	18.5
X2 (mm)	800	720	800	960
X3 (mm)	800	690	800	960
X4 (mm)	750	630	750	780
X5 (mm)	4320	2520	4320	4320
X6 (mm)	15.0	11.0	15.0	16.0
X7 (mm)	2300	2000	2300	2600
X8 (mm)	13.0	10.5	13.0	10.5
X9 (mm)	16.0	10.5	16.0	10.5
X10 (mm)	15.0	10.5	15.0	10.5
X11 (mm)	15.0	10.5	15.0	10.5
X12 (mm)	1550	1000	1550	1400
X13 (mm)	13.5	11.0	13.5	14.0
Results	12,905	12,544	16.121	15.713

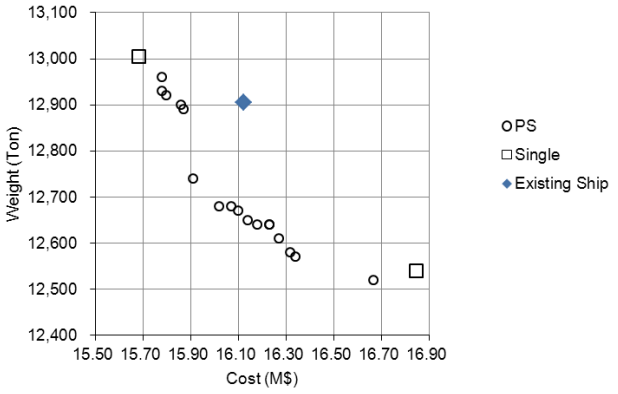

Fig. 4 Comparison of optimization results between existing and design ship

8. 결 론

본 연구에서는 유조선의 설계와 구획배치에 필요한 규정인

MARPOL, SOLAS, CSR에 기반하여 선수미부 및 중앙 화물창의 구획을 자동 생성하는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 통해 생성된 구획 정보를 바탕으로 최적 구조설계를 수행하였으며 실적선의 구획배치에 따른 최적 구조설계 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개발된 구획배치 자동화 프로그램에서 Ez-COMPART 시스템을 호출하여 산정하는 용적 계산의 정확성을 검증하기 위하여 실적선과 동일한 구획배치를 구현한 결과 실적선과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

2) 개발된 구획배치 자동화 알고리즘으로부터 도출된 화물창 용적은 실적선보다 1.2% 이상 상회하였으며, 정수 중 굽힘 모멘트(S.W.B.M.) 역시 줄어든 것을 알 수 있었다.

이를 분석한 결과 선박의 주요 치수를 동일하게 유지할 경우 재화 중량을 1,355ton 정도 늘릴 수 있으며, 주요 치수를 변경할 경우 선박의 길이를 약 3m 정도 감소시킬 수 있는 것으로 파악되어 현업의 실 설계에 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

3) 개발된 구획배치 자동화 알고리즘을 통한 구획배치 결과가 선체 구조설계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 개발된 구획배치 알고리즘 결과에 따른 설계안에 대해 다목적함수 최적 구조설계를 수행하여 실적선 구획배치에 따른 최적 구조설계와 비교하였다.

그 결과 개발된 구획배치 자동화 알고리즘으로 최적 설계된 선박은 실적선에 비해 361ton 정도 중량을 감소시킬 수 있었으며, 40만$ 정도의 건조비를 감소시킬 수 있는 구조설계가 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 STX조선해양 기술연구소의 지원으로 수행된 바, 회사 관계자께 감사드립니다. 아울러 선박계산 모듈을 본 연구의 주 프로그램에 연동시킬 수 있도록 기술지원을 아끼지 않은 ㈜이지그라프 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Byun, Y.C. Lee, K.Y. & Lee, K.H., 1997. A study on the expert system to support compartment arrangement in preliminary ship design. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, SNAK, Seoul, 13-14 November 1997, pp.79-82.

Cohen, J.L., 1978. *Multi-objective Programming and Planning*. Dover Pubns: America.

Hajela, P. & Shin, C.J., 1990. Multi-objective Optimum Design in Mixed Interger and Discrete Design Variable Problems. *AIAA Journal*, 28(4), pp.670-675.

Han, S.N. & Lee, K.Y., 2000. A study on the optimum compartment layout design for the naval ship. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting*, SNAK, Ulsan, 9-10 November 2000, pp.74-79.

Han, S.N. Lee, K.Y. & Roh, M.I., 2001. A Study on the Optimal Facility Layout Design Using an Improved Genetic Algorithm. *International Journal of CAD/CAM*, 6(3), pp.174-183.

Jang, C.D. Jung, J.J. & Shin, C.H., 1997. Minimum weight design of mid-ship section of double hull oil tanker by hybrid evolution strategies. *Proceedings of Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures*.

Jang, C.D. & Na, S.S., 1987. On the minimum structural weight design of oil tankers by generalized slop deflection method. *Proceedings of 3rd International Symposium on Practical Design & Mobil Units,* Norway.

Jang, C.D. & Na, S.S., 1996. Minimum Weight Design of Transverse Frames of Oil Tankers by Generalized Slope Deflection Method. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(3), pp.103-111.

Jo, Y.C., 2010. *Optimum structural design system for double hull oil tanker based on elementary plate panel considering common structural rules*. Ph.D. Seoul National University.

Kim, K.H., 1994. *Optimum structural design by using multi-objective function method with genetic algorithm.* Ph.D. Seoul National University.

Knowles, J.D., 1999. The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Pareto Multi-objective Optimization. *IEEE*.

Korean Register of Shipping, 2009. *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (Part 12)*.

Koski, J. & Silvennoinen, R., 1982. Pareto Optima of Iso-static Trusses. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* 31(3), pp.265-279.

Lee, K.H. & Lee, K.Y., 1996. Knowledge-based approach to a compartment division design of double hull tanker. *Proceedings of the Annual Spring Meeting*, pp.29-32.

Na, S.S., 2005. Development of a Multi-objective Function Method Based on Pareto Optimal Point. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 42(2), pp.175-182.

Na, S.S. Min, K.S. Urm, H.S. & Shin, D.H., 1985. Minimum Weight Design of Transverse Strength Member by using Finite Element Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 22(3), pp.27-37.

Shin, S.H. Song, H.C. & Jang, C.D., 2006. Optimum Structural Design of Tankers Using Multi-objective Optimization Technique. *Ships and Offshore Structures*, 1(3), pp.213-219.

Song, H.C. Na, S.S. & Jo, D.Y., 2012. Development of Optimum Structural Design System for Compartment Arrangement Based on CSR. *Final Report of Joint Research between Mokpo National University & STX Offshore & Shipbuilding Co*.

Stadler, W., 1977. Natural Structural Shapes of Shallow Arches. *Journal of Applied Mechanics*, 44(2), pp.291-298.

Stidsen, T.J. Caprani, O. & Michalewicz, Z., 1999. A Parabolic Operator for Parameter Optimization Problems. *IEEE*.