

Pareto 최적점 기반 다목적함수 기법에 의한 이중선각유조선의 최적구조설계

나승수^{*,}, 염재선^{*}, 한상민^{**}

목포대학교 기계선박해양공학부^{*}, 삼성중공업 조선플랜트연구소^{**}

Optimum Structural Design of D/H Tankers
by using Pareto Optimal based Multi-objective Function Method

Seung-Soo Na^{*,}, Jae-Seon Yum^{*} and Sang-Min Han^{**}

Dept. of Naval Architecture & Marine Engineering, Mokpo National University^{*}
Shipbuilding & Plant R&D Institute, Samsung Heavy Industry^{**}

Abstract

A structural design system is developed for the optimum design of double hull tankers based on the multi-objective function method. As a multi-objective function method, Pareto optimal based random search method is adopted to find the minimum structural weight and fabrication cost. The fabrication cost model is developed by considering the welding technique, welding poses and assembly stages to manage the fabrication man-hour and process.

In this study, a new structural design is investigated due to the rapidly increased material cost. Several optimum structural designs on the basis of high material cost are carried out based on the Pareto optimal set obtained by the random search method. The design results are compared with existing ship, which is designed under low material cost.

※Keywords: Multi-objective function method(다목적함수기법), Random search method (무작위탐색법), Fabrication cost model (건조비모델), Pareto optimal set(Pareto 최적점)

1. 서 언

지난 몇 십년 전부터, 각 조선소에서는 선체 중량을 최소화하는 에너지 절약형 선박을 개발하는

데 노력을 다해오고 있다.

그 동안 인건비의 상승으로 인해 선체 중량뿐만 아니라 건조비까지 고려하여 선체 중량 및 건조비를 최소로 하는 경제적인 설계를 수행하는데 전력을 다하고 있으며, 최근에 들어 원자재비의 급상승으로 인해 선체 구조의 새로운 설계 방안을 모색할 필요성이 대두되고 있다.

접수일: 2005년 3월 3일, 승인일: 2005년 6월 15일

†주저자, E-mail: ssna@mokpo.ac.kr

Tel: 061-450-2761

다목적함수기법에 의한 최적 설계 연구는 1896년에 발표된 Pareto 에 의한 다목적함수 최적화기법(Pareto 1896)을 이용하여 그 동안 다수의 연구(임상전과 양영순 1988, 신상훈 2000, 신상훈 등 2002)가 이루어지고 있으나 실제 설계에 적용하기는 아직 어려운 점이 많이 있다.

본 연구에서는 이중 선각 유조선에 대상으로 각 선급 규정 (DnV, Lloyd, ABS)에 따라 최적 선체 구조 설계 시스템을 개발하였다. 선체를 종강도 부재, 횡강도 부재 및 횡격벽 부재로 나누고, 종강도 부재에 대해서는 각 선급 규정을 만족하도록 하였으며, 횡강도 부재 및 횡격벽 부재에 대해서는 일반화 경사처짐법(장창두와 나승수 1992, 장창두와 나승수 2000)을 이용하였다.

건조비 추정 방법으로는 상대건조비 개념(봉현수 1990)을 도입하고, 블록의 제작 순서도에 따라 용접방법, 용접자세 및 조립단계를 고려하여 건조비를 추정할 수 있는 모델을 개발하였다.

최적화 기법으로는 다목적 함수 기법의 일종인 무작위 탐색법 (Random search method)을 기존의 단일목적함수 기법의 일종인 탐색법 (Search method)과 연결하여 새로운 기법인 Pareto 최적점 기반 무작위 탐색기법(Na and Karr 2002, 나승수 2005)을 이용하였다. 또한, 본 연구에서는 최근 원자재비의 급등으로 인한 대형 이중 선각 유조선(300K VLCC)의 선체 중량 및 건조비를 최소로 하는 설계를 수행(나승수와 영재선 2004)하고 실적선과 비교하여 효율적인 설계를 제시하고자 한다.

2. 선체 구조 부재의 치수 결정

선체 구조를 종강도 부재, 횡강도 부재 및 횡격벽 부재로 나누고, 종강도 부재에 대해서는 선급 규정을 이용하여 부재 치수를 결정하고, 횡강도 부재에 대해서는 간이 횡강도 해석 기법인 일반화 경사처짐법을 이용하여 치수를 결정하였다. 또한, 횡격벽 부재 중 횡격벽판은 선급 규정을, stringer 에 대해서는 일반화 경사처짐법을 이용하여 치수를 결정하였다.

2.1 종강도 부재의 치수 결정

판 부재의 두께나 종늑골의 형상 등 종강도 부재의 치수를 결정하기 위해서는 갑판 두께를 제외한 모든 종강도 부재는 선급 규정을 최소로 만족하도록 결정하고, 종강도를 만족시키는 갑판 두께를 결정하였다. 선급 규정은 널리 사용되고 있는 DnV, Lloyd 및 ABS 선급 규정을 선정하여 code 화하였다.

2.2 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 치수 결정

횡강도 부재인 web 높이와 두께 등 web frame 의 치수와 횡격벽 부재인 stringer 높이와 두께 등 stringer 의 치수는 일반화 경사처짐법을 이용하여 각 부재의 응력을 계산하고, 허용응력을 넘지 않도록 치수를 결정하였다.

3. 다목적함수 최적화 기법

3.1 다목적함수 (F₁, F₂)

다목적함수로는 선체중량 (F₁) 과 선체건조비 (F₂)를 선정하였다. 선체 중량은 화물창부의 중량과 선수미부의 중량의 합으로 하되, 화물창부의 중량은 앞에서 구한 종강도 부재의 치수, 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 치수를 이용하여 구하였으며, 선수미부의 중량은 추정공식을 이용하여 구하였다.

선체건조비는 상대건조비 개념을 도입하여 각 블록당 선체 구조 부재의 설계에 영향을 많이 주는 항목인 자재비와 인건비의 합으로 하되, 그 중 인건비는 아래와 같이 용접방법, 용접자세 및 조립단계를 고려하여 보다 상세하게 구하였다.

$$F_2 = C_M(\text{자재비}) + C_L(\text{인건비}) \tag{1}$$

자재비와 인건비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_M &= W_s \times U_M \\ C_L &= M_J \times U_L + M_W \times U_L \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, W_s : 구조중량

$$M_J = \text{Joint Length} \times \text{Unit Joint M-H}$$

$M_w = \text{Weld Length} \times \text{Unit Weld M-H}$
 M_j, M_w : 취부 및 용접 M-H
 U_M, U_L : 톤당 자재비 및 M-H 당 인건비

3.2 설계변수 (X)

설계변수로는 종강도 부재에 대해서는 갑판두께 (X1), 선저와 선측에서의 종늑골 간격 (X2, X3) 과 web 간격 (X4), 횡강도 부재에 대해서는 각 web 의 높이 및 두께 (X6~X17), 횡격벽 부재에 대해서는 각 stringer 의 높이 및 두께 (X18~X29) 로 정하였다.

3.3 제한조건 (G)

종강도 부재에 대한 제한조건으로는 각 선급에서 요구하는 최소 갑판 두께와 선저와 갑판에서의 최소 선각 단면계수를, 횡강도 부재의 경우 각 web 의 허용등가응력, 허용전단응력과 좌굴을 방지하기 위한 최소 두께를, 횡격벽 부재의 경우 각 stringer 의 허용등가응력, 허용전단응력과 좌굴을 방지하기 위한 최소 두께가 고려되었다. 또한, 횡격벽판은 각 선급규정에서 요구하는 최소 두께로 결정하였다.

3.4 다목적함수 최적화 기법 (나승수 2005)

3.4.1 Pareto 최적점 기반 다목적함수 최적화 기법

1) 주어진 설계영역 안에 무작위로 초기치를 발생시키고, 이산화변수로 변환시킨다.

$$(x_j)_i = (x_j)_{\min} + r_1 * \{(x_j)_{\max} - (x_j)_{\min}\} \quad (3)$$

$r_1 = \text{RAN}() : 0.0 < r_1 < 1.0$

여기서, $(x_j)_{\min}$ = 각 설계변수의 하한 값
 $(x_j)_{\max}$ = 각 설계변수의 상한 값
 i = 초기발생점 번호 ($1 \leq i \leq \text{NPI}$)
 j = 설계변수 번호 ($1 \leq j \leq N$)
 NPI = 초기발생점 수
 N = 설계변수 수

2) 목적함수와 제한조건식을 계산하고, 위반함

수를 계산하여 제한조건을 만족하는 발생점 중 Pareto 조건을 만족하는 Pareto 최적점을 찾는다. Pareto 최적점은 다른 목적함수 값을 증가시키지 않으면서 자신의 목적함수 값을 줄일 수 없는 점들이다.

2) 에서 구한 점이나 4) 에서 구한 점을 이용하여 새로운 점들을 발생시키고, 이산화 변수로 변환한다.

$$(x_j)_i = (x_j)_m + \delta_j * r_2 * \{(x_j)_{\max} - (x_j)_{\min}\} \quad (4)$$

$m = \text{RAN}() * \text{NPAR} + 1$
 $r_2 = 2.0 * \text{RAN}() - 1.0 : -1.0 < r_2 < 1.0$

여기서, δ = 탐색폭 ($0.0 < \delta < 0.5$)

NPAR = Pareto 최적점 수

목적함수와 제한조건식을 계산하고, 위반함수를 계산하여 Pareto 최적점을 찾는다.

수렴조건으로는 전 단계와 현 단계에서 각 목적함수 차이의 평균 값이 수렴조건 ϵ_1 보다 작으면 탐색폭을 줄이고, 탐색폭이 수렴조건 ϵ_2 보다 작으면 수렴한 것으로 보고 탐색을 종료한다.

수렴조건을 만족할 때까지 3) 에서 5) 과정을 반복한다.

목적함수가 하나인 경우에는 계산된 위반함수 값 중 작은 순서대로 몇 개를 찾고, 이 값에 해당하는 설계점을 Pareto 최적점으로 보면 앞에서 유도된 알고리즘을 이용하여 동일한 방법으로 최적점을 찾을 수 있다.

4. 선체의 건조비 추정 모델 개발

4.1 선체의 상대 건조비

재료비 (Material Cost)

재료비는 재질에 따른 구조 중량에 재료 단가를 곱한 값으로서 다음과 같다.

$$\text{재료비}(\$) = \text{구조중량}(\text{Ton}) * \text{재료단가}(\$/\text{Ton})$$

여기서, 구조중량 : 재질별 구조부재의 중량

재료단가 : 재질별 단가

- Mild steel : 710 \$/Ton

- HT32 : 740 \$/Ton

- HT36 : 764 \$/Ton

2) 인건비 (Labor Cost)

인건비는 취부 공수 및 용접 공수에 노임 단가를 곱한 값으로서 다음과 같다.

$$\text{인건비}(\$) = \text{취부공수}(M-H) * \text{노임단가}(\$ / M-H) + \text{용접공수}(M-H) * \text{노임단가}(\$ / M-H)$$

여기서, 취부공수 = 취부장*취부단위공수
 용접공수 = 용접장*용접단위공수

4.4 생산공정을 고려한 선체의 건조비 추정

선체의 건조비 추정을 위해서는 선체를 여러 개의 탑재 블록으로 분할하고, 각 탑재 블록은 선행 탑재, 대조립, 중조립, 소조립 순으로 분할하여 각 조립 단계에 포함될 작업 내용을 분류하고 각 조립 단계 및 탑재 블록 별로 취부 길이와 용접 길이를 산출하여야 한다. 실제로 각 조선소에서는 건조 시수를 산출하기 위해 용접 기법, 조립 단계 및 용접 자세에 따른 취부 시수와 용접 시수에 대한 표준 선각 시수표 (Table 1)를 작성하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 조선소에서 사용하고 있는 선각 표준 시수표를 전산화하고 취부 길이와 용접 길이를 구한 후, 선각 표준 시수표에 의해 취부 시수와 용접 시수를 찾아 건조비를 산정할 수 있는 선체의 건조비 추정 모델을 개발하였다.

5. 연구결과 및 고찰

5.1 설계 대상

대형 이중 선각 유조선 (300K VLCC)의 설계를 위해 Fig. 1 에서 보인 실적선 (DnV 선급)을 설계 대상으로 정하였다.

5.2 최적설계 결과

Fig. 2 에 실적선과 동일한 선급규정(DnV)으로 중늑골 간격 및 web 간격에 따른 중강도 부재의 최적설계 결과를 나타내었는데, 대부분의 설계치수가 실적선과 동일함을 보여주어 프로그램의 정도가 좋을 수 있다. 이 프로그램을 이용하여 중늑골 간격 및 web 간격을 변화시켜가며 최적설계를 수행하여 최소중량 및 건조비를 주는 설계치수를 찾고자 한다.

Table 1 Standard Man-Hour table(Fillet elding)

Unit : M-H/m

Case	Stage	Pose	Joint	Weld		
				Throat Tk	4.5	5.0
CO ₂	Assem	F	0.24	0.19	0.23	0.27
		V	0.27	0.38	0.46	0.54
	Erect	F	0.51	0.24	0.29	0.34
		V	0.62	0.48	0.57	0.67
Manual	Assem	F	0.24	0.63	0.71	0.76
		V(U)	0.27	1.13	1.19	1.35
		V(D)	0.27	0.38	0.50	0.59
		O	0.57	0.86	0.96	1.14
	Erect	F	0.51	0.79	0.89	0.95
		V(U)	0.62	1.42	1.49	1.70
		V(D)	0.62	0.48	0.63	0.74
		O	0.95	1.08	1.21	1.43

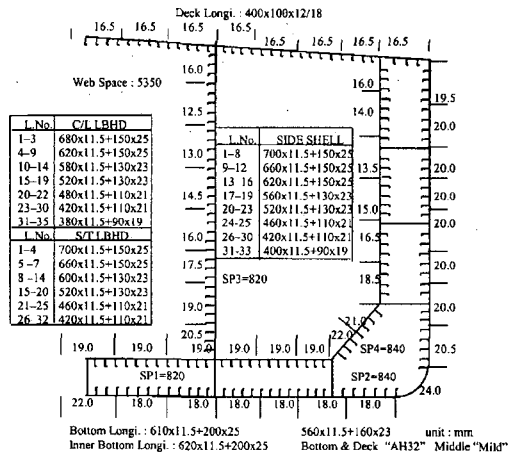


Fig. 1 Existing ship (DnV base)

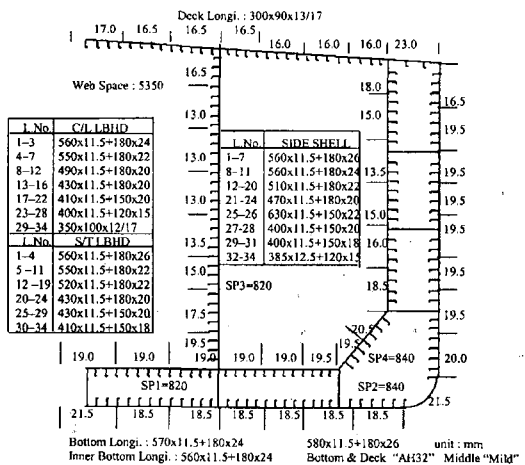
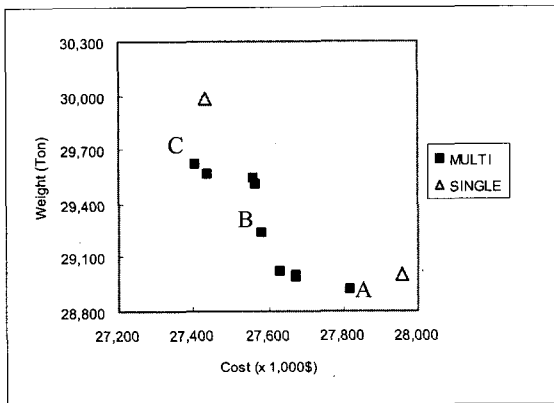


Fig. 2 Present design (DnV base)

Fig. 3 에 DnV 선급 규정에 따른 Pareto 최적점을 보여 주고 있다. 여기서, 선체중량은 선박 전체의 선각중량을 나타내며, 건조비는 전 화물창의 건조비를 나타낸다. 최소중량설계 (Case A)를 하기 위해서는 주어진 설계 영역 안에서 가장 작은 중늑골 간격 및 web 간격이 되도록 해야 하며, 최소건조비설계 (Case C)를 하기 위해서는 상당히 큰 중늑골 간격과 web 간격이 필요함을 알 수 있다. 또한, 구해진 다양한 Pareto 최적점을 이용하여 현재 회사사정에 알맞은 설계 (Case B)를 수행할 수 있다.

최소중량 또는 최소건조비에 대한 단일목적함수 기법에 의한 결과 (SINGLE)와 다목적함수 기법에 의한 결과 (MULTI)는 거의 동일함을 보이고 있어, 빠른 시간 내에 최적설계를 하기 위해서는 중량을 최소로 하는 것보다 건조비를 최소로 하는 것이 경제적이기 때문에 최소건조비설계를 수행하는 것이 바람직하다.

또한, 원자재비의 급상승에 따른 설계 비교를



Case	W (Ton)	C (*10 ⁶ \$)	Btm longi. space (mm)	Side longi. space (mm)	Web Space (m)
Existing	29758	27.484	820	820	5.35
A	28923	27.820	720	720	4.38
B	29021	27.632	750	780	4.38
C	29624	27.405	840	810	4.82

Fig. 3 Pareto optimal set (U_M=\$710/Ton)

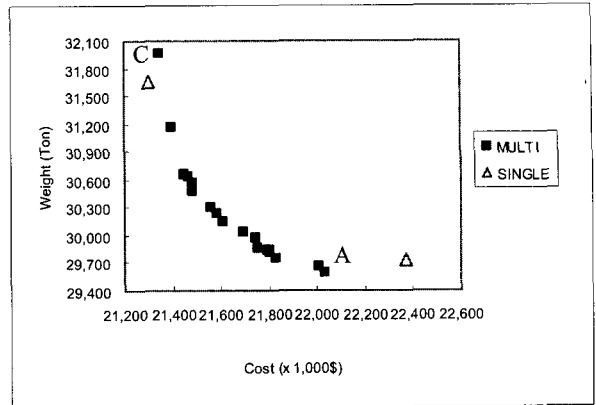


Fig. 4 Pareto optimal set (U_M=\$450/Ton)

위해 Fig. 4 에 현재의 원자재비 (\$450/Ton)를 기준으로 DnV 선급 규정에 따른 Pareto 최적점을 보여 주고 있다. Fig. 3 과 Fig. 4 의 결과를 분석해보면, 원자재비가 상승함에 따라 최소중량을 주는 중늑골 간격 및 web 간격은 변함이 없으나, 최소 건조비 설계를 위한 중늑골 간격은 900mm 근처에서 800mm 근처로 줄어들고 있고, web 간격도 6m 근처에서 5m 근처로 줄어들고 있어 기존 설계의 수정이 필요함을 알 수 있다.

6. 결 언

단일목적함수 기법 및 다목적함수 기법을 이용하여 중량 및 건조비를 최소로 하는 설계치수를 찾아 실적선과 비교 검토하였다. 최적화 기법으로는 Pareto 최적점 기반 무작위탐색 기법을 이용하였으며, 좀 더 상세한 건조비 추정을 위해 생산공정을 고려한 건조비 추정 방법을 이용하였다. 실선 설계에 적용하고자 대형 이종 선각 유조선에 대해 최적구조설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Pareto 최적점 기반 무작위탐색 기법은 폭 넓고 안정되게 전체 최적점을 찾을 수 있다.

2) 다목적함수 기법에 의한 결과와 단일 목적함수 기법에 의한 최소중량 또는 최소건조비 값은 대동 소이하므로 신속하게 최적설계를 하기 위해서는 최소건조비 설계를 하는 것이 바람직하다.

3) 원자재비가 급상승하면 중늑골의 간격 및 web 의 간격이 현재 (원자재비가 상승하기 이전) 보다 줄아지는 쪽으로 설계를 해야 최소건조비 설계를 할 수 있다.

4) 향후 최소건조비 설계를 위해 원자재비의 점진적인 증가에 따른 구조설계의 변화에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 삼성중공업에서 지원한 이중 선각 유조선의 최적 구조 설계 시스템 개발 과제의 일부 임을 밝혀드립니다.

참 고 문 헌

- 나승수, 2005, " Pareto 최적점 기반 다목적함수 기법 개발에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 2 호, pp. 184-191.
- 나승수, 염재선, 2004, 이중 선각 유조선의 최적 구조설계 시스템 개발, 삼성중공업 연구보고서.
- 봉현수, 1990, "개념설계 단계에서 총건조비를 최소화하는 생산지향적 설계 적용 방향," 대한조선학회지, 제 27 권, 제 3 호, pp. 131-137.

- 신상훈, 2000, 다목적함수 최적화 기법을 이용한 유조선의 최적 설계, 서울대학교 박사학위논문.
- 신상훈, 장창두, 송하철, 2002, " 다목적함수 최적화기법을 이용한 유조선의 최적구조설계." 한 국전산구조공학회논문집, 제 15 권, 제 4 호, pp. 591-598.
- 임상전, 양영순, 1988, "다목적함수 최적화기법에 의한 격자형구조물의 최적구조설계", 대한조선학회지, 제 25 권, 제 1 호, pp. 11-20.
- 장창두, 나승수, 1992, " 선체구조해석 및 설계를 위한 일반화 경사처점법 개발에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 29 권, 제 4 호, pp. 202-213.
- 장창두, 나승수, 2000, " 이중선각유조선의 최적 구조설계 시스템 개발," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 1 호, pp.118-126.
- Na, S.S. and Karr, D.G., 2002, "Product-oriented Optimum Structural Design of Double-Hull Oil Tankers," Journal of Ship Production, Vol. 18, No. 4, pp. 237-248.
- Pareto, V., 1896, Cours d'Economie Politique, F. Rouge, Lausanne.



< 나 승 수 >



< 염 재 선 >



< 한 상 민 >