

## CSR 을 활용한 이중선각유조선 중앙단면의 최적구조설계

나승수\*\*, 전형근\*\*

목포대학교 기계·선박해양공학부\*, 대한조선 선체설계팀\*\*

Optimum Structural Design of Mid-ship Section of D/H Tankers  
Based on Common Structural Rules

Seung-Soo Na\* and Hyoung-Geun Jeon\*\*

Mokpo National University\*, Daehan Shipbuilding Company\*\*

### Abstract

It is necessary to perform the research works on the general structural designs and optimum structural designs of double hull tankers and bulk carriers due to the newly built Common Structural Rules(CSR).

In this study, an optimum structural design of a mid-ship part of double hull oil tanker was carried out by using the CSR. An optimum structural design program was developed by using the Pareto optimal based multi-objective function method.

The hull weight and fabrication cost obtained by the single and multi-objective function methods were compared with existing ship by the consideration of CSR and material cost which is recently increasing.

※Keywords: Common structural rules(통합구조규정), Multi-objective function method (다목적함수기법), Pareto optimal (Pareto 최적점), Optimum structural design(최적구조설계)

### 1. 서 언

지난 몇 십년 전부터, 각 조선소에서는 인건비의 상승으로 인해 선체 중량 및 건조비를 최소화 하는 경제적인 설계를 수행하는데 전력을 다하고

있다.

최근에 들어 원자재비의 급상승으로 인해 선체 구조의 새로운 설계 방안을 모색할 필요성이 대두 되고 있다.

다목적함수기법에 의한 최적 설계 연구는 1896 년에 발표된 Pareto 에 의한 다목적함수 최적화기 법(Pareto 1896)을 이용하여 그 동안 다수의 연구 (Shin 2000)가 이루어지고 있으나 실제 설계에 적용하기는 아직 어려운 점이 많이 있다.

접수일 : 2007 년 11 월 27 일, 승인일: 2008 년 3 월 6 일

✉교신저자: ssna@mokpo.ac.kr, 061-450-2761

최근 통합구조규정(CSR) 이 확정됨에 따라 이중선체유조선과 산적화물선의 최적구조설계에 대한 많은 연구가 절실히 요구되고 있고, 현재 우리나라의 중대형조선소에서도 CSR 을 적용한 효율적인 선박설계를 위하여 CSR 에 대한 교육은 물론 CSR 기반 연구과제들을 수행하고 있다.

본 연구에서는 이중선각유조선을 대상으로 CSR 에 따라 영업설계 또는 초기설계 단계에서 요구되는 종늑골 및 웨브 간격을 결정하기 위한 선체 중앙부의 최적 구조 설계 프로그램을 개발하였고, 프로그램의 정도를 비교하기 위해 한국선급에서 개발한 SeaTrust-CSR(KR 2006)의 하중 및 설계 치수와 비교하였다.

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, Na 2005, Na et al. 2005)을 이용하였다. 또한, 본 연구에서는 최근 원자재비의 급등으로 인한 대형 이중 선각 유조선(300K VLCC)의 선체 중량 및 건조비를 최소화 하는 설계를 수행하고, 실적선과 비교하여 효율적인 설계를 제시하고자 한다.

**2. 통합구조규정(CSR)**

CSR 은 선급간의 불필요한 경쟁을 방지하고 보험회사와 선주사들의 깊어가는 불신을 막으며, 설계의 투명성 확보 및 Yard 에 대한 기술 우위력을 지속 유지시키고, 국제해사기구(IMO)의 목적기반 설계기준(Goal Based Standard)에 부합하도록 되어 있다.

이 규정의 특징은 Design Life 가 25년(기존 20년)이고, North Atlantic 운항조건을 만족하며, 기존 각 선급의 규정 대비 부식 여유치가 증가하였다. 그리고 Ship Motion 및 Dynamic Factor 에 의한 Load Combination 을 고려한 하중계산을 해야 하며, 구조해석 시 Load Condition 이 기존 각 선급의 Rule 대비 6 배로 증가하였으며 좌굴계산시 비선형 해석프로그램의 강제화와 각종 해석에 대한 상세한 Guide 를 제시하여야 한다. 또한 기존 2

Hold 로 행하던 구조해석을 3 Hold 에 걸쳐 수행해야 하며 응력이 집중하는 부분에 대해서는 Fine Mesh Analysis 강제 사항이 있다.

CSR 은 하중, Net Scantling Approach, 국부 및 선체거더 최종강도, 피로강도 및 유한요소 직접해석 등 구조규칙 전반에 걸쳐 현행 각 선급의 규칙과는 개념 차이는 물론 합리적으로 강화하였고, 궁극적인 목표는 인명, 환경 및 재산과 관련하여 구조적인 손상으로 인한 위험을 줄이고, 선체구조의 적절한 내구성을 설계 수명 동안 제공하는 규정을 확립하는데 있다.

**2.1 종강도 부재의 치수 결정**

종강도 부재의 치수를 결정하기 위해서 갑판 두께를 제외한 모든 종강도 부재는 다음 식과 같이 CSR 을 최소로 만족하는 치수로 결정하였다.

$$t_{net} = 0.0158 \alpha_p s \sqrt{\frac{|P|}{C_a \sigma_{yd}}} \tag{1}$$

$$Z_{net} = \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \tag{2}$$

- 여기서,  $p$  : 설계 하중
- $\alpha_p$  : 수정 계수
- $s$  : 종늑골 간격
- $C_a, C_s$  : 허용굽힘응력계수
- $f_{bdg}$  : 굽힘모멘트계수
- $l_{bdg}$  : 유효굽힘스팬
- $\sigma_{yd}$  : 최소항복응력

**2.2 CSR 의 하중**

치수요건이나 구조평가에 사용되는 하중은 선박이 항해 및 항내 운항 중에 만나는 모든 하중 시나리오를 포함하고 설계하중조합은 하중 시나리오를 나타내는 국부하중 및 전선하중으로 구성하며 정상운항에서 일어나는 모든 시나리오를 포함하도록 충분히 가혹하고 다양하여야 한다.

하중은 선체 및 구조 부재에 대한 설계하중으로 모든 하중의 조합에서도 일관된 안전 수준을 유

**Table 1** Design load set

structural member	design load set	load	draft
keel, bottom, bilge, side,	1	$P_{ex}$	$T_{sc}$
	2	$P_{ex}$	$T_{sc}$
	7	$P_{in} - P_{ex}$	$T_{bal}$
	8	$P_{in} - P_{ex}$	$0.25 T_{sc}$

**Table 2** Dynamic factor

wave direction		head sea		oblique sea	
max. response		$M_{wv}$	$a_v$	$M_{wv-h}$	
dynamic load case		1	2	4a	4b
$M_{wv}$	$f_v$	1.0	-1.0	-0.2	-0.2
$M_{wv-h}$	$f_{mh}$	0.0	0.0	1.0	-1.0

지하기 위하여 Table 1 에서 보인 설계하중 세트를 따른다.

판 및 종늑골 부재의 치수를 결정함에 있어서 CSR 은 많은 시간과 데이터를 필요로 하게 되는데, 그 이유는 부재치수 결정에 하중계산이 매우 복잡하기 때문이다. 이 하중계산은 Ship Motion 및 Dynamic Factor(Table 2) 고려에 의한 Load Combination 으로 하중조건이 무수히 많아져 어떤 한 부재의 치수를 결정함에 있어서도 많은 시간과 데이터를 필요로 한다.

### 3. 다목적함수 최적화 기법

#### 3.1 다목적함수 ( $F_1, F_2$ )

다목적함수로는 선체중량 ( $F_1$ ) 과 선체건조비 ( $F_2$ )를 선정하였다. 선체 중량은 단위길이당 종강도 부재의 중량( $W_L$ )에 화물창 하나의 길이( $T_L$ )를 곱한 값으로 하며, 선체건조비는 상대건조비 개념을 도입하여 선체 구조 부재의 설계에 영향을 많이 주는 항목인 자재비와 인건비의 합으로 하였다.

$$F_1 = W_L * T_L$$

$$F_2 = C_M(\text{자재비}) + C_L(\text{인건비}) \quad (3)$$

#### 3.2 설계변수 (X)

설계변수로는 갑판두께(X1), 선저, 선측 및 호퍼탱크내에서의 종늑골 간격(X2, X3, X4)과 web 간격(X5) 으로 정하였다. 종늑골 간격은 700mm 에서 1,000mm 범위로 하였다.

#### 3.3 제한조건 (G)

제한조건으로는 각 선급에서 요구하는 최소 갑판 두께와 선저와 갑판에서의 최소 선각 단면계수로 결정하였다.

#### 3.4 다목적함수 최적화 기법 (Na 2005)

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

$$(x_j)_i = (x_j)_{min} + r_1 * \{(x_j)_{max} - (x_j)_{min}\} \quad (4)$$

$$r_1 = RAN() : 0.0 < r_1 < 1.0$$

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

2) 목적함수와 제한조건식을 계산하고, 위반함수를 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.

3) 2)에서 구한 점이나 4)에서 구한 점을 이용하여 새로운 점들을 발생시키고, 이산화변수로 변환한다.

$$(x_j)_i = (x_j)_m + \delta_j * r_2 * \{(x_j)_{max} - (x_j)_{min}\} \quad (5)$$

$$m = RAN() * NPAR + 1$$

$$r_2 = 2.0 * RAN() - 1.0 : -1.0 < r_2 < 1.0$$

여기서,  $\delta$  = 탐색폭 ( $0.0 < \delta < 0.5$ )

NPAR = Pareto 최적점 수

4) 목적함수와 제한조건식을 계산하고,

위반함수를 계산하여 Pareto 최적점을 찾는다.

5) 수렴조건으로는 전 단계와 현 단계에서 목적함수 차이의 평균 값이 수렴조건  $\epsilon_1$  보다 작으면 탐색폭을 줄이고, 탐색폭이 수렴조건  $\epsilon_2$  보다 작으면 수렴한 것으로 보고 탐색을 종료한다.

6) 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 상대 건조비 추정

4.1 자재비(Material Cost) 추정

자재비는 재질에 따른 구조 중량에 자재 단가를 곱한 값으로서 다음과 같다.

자재비(\$)=구조중량(Ton)\*자재단가(\$/Ton) (6)

여기서, 구조중량 : 재질별 구조부재의 중량

자재단가 : 재질별 단가

- Mild steel : \$660 /Ton
- HT32 : \$690 /Ton
- HT36 : \$710 /Ton

4.2 인건비(Labour Cost) 추정

인건비를 구하기 위해 단순한 추정 방법인 취부장과 용접장을 고려한 조립장을 이용하였다. 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 인건비를 추정하기 위해 종강도 부재와 횡강도 부재가 만나는 조립장을 고려하였으며, 횡격벽 부재에 붙어있는 수직 보강재에 대한 조립장도 고려하였다. 인건비는 조립공수에 노임단가를 곱한 값으로서 다음과 같이 구하였다. 여기서, 노임단가는 \$50/M-H 를, 조립단위공수는 fillet 용접인 경우 2.0 M-H/m, butt 용접인 경우 3.0 M-H/m 를 사용하였다.

인건비(\$)=조립공수(M-H)\*노임단가(\$/M-H) (7)

여기서, 조립공수 = 조립장\*조립단위공수

5. 연구결과 및 고찰

5.1 설계 대상 및 정도 비교

대형 이중선각유조선 (300K VLCC)의 설계를 위해 Fig. 1 에서 보인 실적선 (ABS 선급)을 설계 대상으로 정하였다. CSR 의 종강도 부재에 대한 부재치수 결정식을 code 화 하여 계산한 각 부재들의 치수와 최근 한국선급(KR)에서 개발한 프로그램(SeaTrust-CSR)에서 계산된 종강도 부재의 치수와 정도 비교를 하였다.

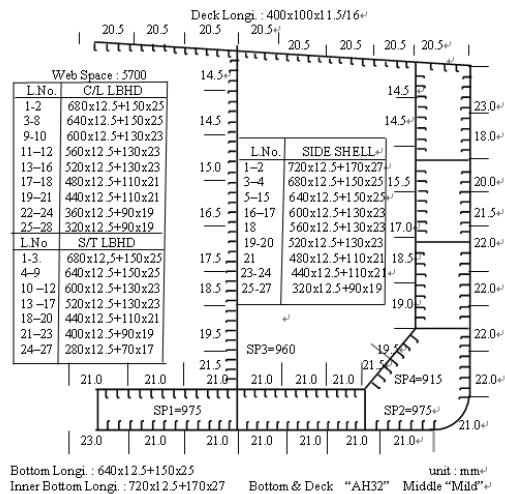


Fig. 1 Existing ship (ABS base)

Table 3 Comparison of accuracy(plate)

KR Program		Present Program	
Pressure (kN/m^2)	t_local (mm)	Pressure (kN/m^2)	t_local (mm)
Bottom			
286.94	16.83	286.94	16.88
Side Shell			
286.94	19.27	286.94	19.33
Longitudinal Bulkhead			
337.49	18.65	334.01	18.55

**Table 4** Comparison of accuracy(longitudinal)

KR Program		Present Program	
Pressure (kN/m <sup>2</sup> )	Z_req (cm <sup>3</sup> )	Pressure (kN/m <sup>2</sup> )	Z_req (cm <sup>3</sup> )
Bottom			
268.66	4432.4	268.58	4732.7
Inner Bottom			
306.94	4460.8	306.91	4219.5
Inner Hull			
247.52	3650.3	247.52	3707.3

Table 3, 4 는 판 및 종늑골의 부재치수를 비교한 결과로써, 본 연구에서 개발한 프로그램과 한국선급의 프로그램 결과와 비교할 때, 하중 및 설계치수의 값이 거의 일치하고 있다.

**5.2 최적설계 결과**

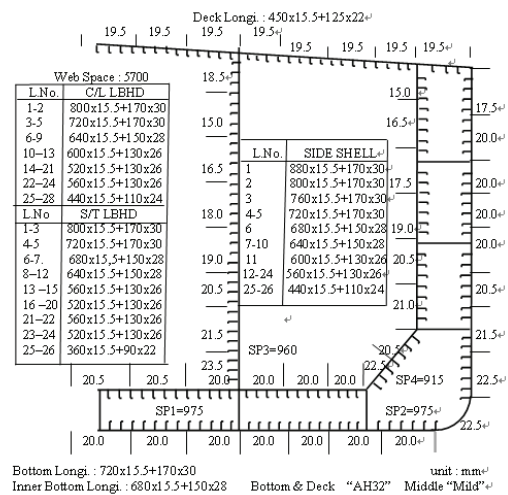
Fig. 2 는 CSR 을 적용하여 실적선과 동일한 종늑골 및 웨브 간격에 따른 중강도 부재의 최적설계 결과를 나타내었다. 판 부재의 두께는 비슷한 양상을 보이고 있는 반면에, 종늑골의 치수는 CSR 을 적용하여 설계한 경우가 상당히 커짐을 알 수 있고, 실제로 중강단면적을 비교해 보면 본 설계 대상의 경우 약 6% 정도가 증가하게 된다.

Fig. 3 과 Fig.4 는 원자재비 증가에 따른 실적선에 대한 Pareto 최적점을 보여 주고 있다. 여기서 선체 중량은 화물창 하나의 중강도 부재에 대한 선체 중량을 나타내며, 건조비는 화물창 하나의 건조비를 나타낸다.

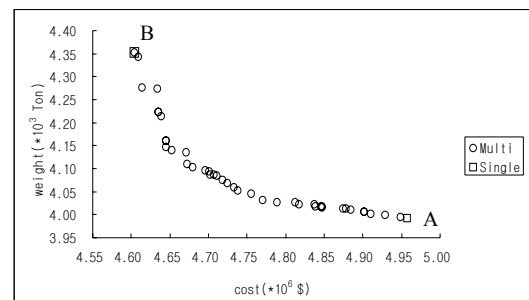
최소중량 설계를 위해서는 주어진 설계 영역 안에서 가장 작은 종늑골 간격 및 웨브 간격이 되도록 해야 하며, 최소 건조비 설계를 위해서는 상당히 큰 종늑골 간격과 웨브 간격이 필요함을 알 수 있다. 또한, 구해진 다양한 Pareto 최적점을 이용하여 현재 회사 사정에 알맞은 설계를 수행할 수 있다.

단일 목적함수 기법에 의한 결과와 다목적함수 기법에 의한 결과는 거의 동일함을 보여주고 있어, 빠른 시간 내에 최적 설계를 하기 위해서는 중량을 최소로 하는 것보다 건조비를 최소로 하는 것

이 경제적이기 때문에 최소 건조비 설계를 수행하는 것이 바람직하다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이 원자재비가 상승하면 종늑골의 간격 및 웨브의 간격이 현재(원자재비가 상승하기 이전)보다 좁아지는 쪽으로 설계를 해야 최소 건조비 설계를 할 수 있음을 알 수 있다.

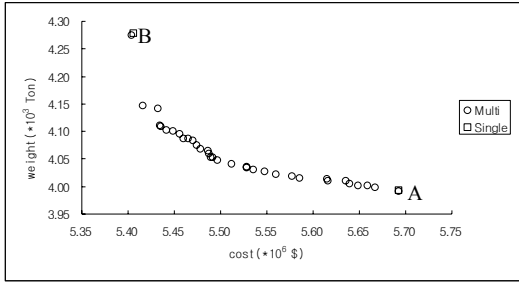


**Fig. 2** Present design (CSR base)



Case	Weight (Ton)	Cost (*10 <sup>6</sup> \$)	Btm Longi Space (mm)	Side Longi Space (mm)	Web Space (m)
Existing	4273	4.54	975	960	5.70
A	3742	4.96	720	780	3.66
B	4351	4.61	960	980	4.66

**Fig. 3** Pareto optimal set (U<sub>M</sub>=\$450/Ton)



Case	Weight (Ton)	Cost (*10 <sup>6</sup> \$)	Btm Longi. Space (mm)	Side Longi. Space (mm)	Web Space (m)
Existing	4273	5.33	975	960	5.70
A	3992	5.69	720	780	3.66
B	4278	5.41	930	980	4.28

Fig. 4 Pareto optimal set ( $U_M = \$660/\text{Ton}$ )

6. 결 언

최적 구조 설계 측면에서 원자재비의 상승으로 인한 영향을 알아보기 위해 단일 목적함수 기법 및 다목적함수 기법을 이용하여 CSR 에 따라 중량 및 건조비를 최소로 하는 설계치수를 찾아 최적선과 비교 검토하였다. 최적화 기법으로는 Pareto 최적점 기반 무작위 탐색 기법을 이용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개발한 프로그램은 기존의 KR 의 SeaTrust-CSR 결과와 비교할 때, 하중 및 설계치수의 값이 거의 일치한다.

2) CSR 에 의한 설계와 기존 설계를 비교하면 판 두께는 비슷하지만 중늑골의 치수가 상당히 커져, 본 설계대상의 경우 중앙단면적이 6% 정도 커진다.

3) 다목적함수 기법에 의한 결과와 단일 목적함수 기법에 의한 최소 중량 또는 최소 건조비 값은 대동 소이하므로 신속하게 최적 설계를 하기 위해서는 최소 건조비 설계를 하는 것이 바람직하다.

4) 원자재비가 급상승하면 중늑골의 간격 및 웨브의 간격이 현재 (원자재비가 상승하기 이전)보다 좁아지는 쪽으로 설계를 해야 최소 건조비 설계를 할 수 있다.

5) 향후 CSR 을 기반으로 종강도 부재를 포함하여 횡강도 부재를 고려한 선체 전체에 대한 최적 설계를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2006 년도 NURI 조선인력양성사업과 2007 년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터 (RIC)에 의하여 지원되었음을 밝혀두며, 재정적인 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Korean Register, 2006, Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers.
- 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, Vol. 42, No. 2, pp. 175-182.
- 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.
- Na, S.S., Yum, J.S. and Han, S.M., 2005, " Optimum Structural Design of D/H Tankers by using Pareto Optimal based Multi-objective Function Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 3, pp. 284-289.
- Pareto, V. ,1896, Cours D' Economie Politique, Vols I and II, F. Rouge, Lausanne.
- Shin, S.H., 2000, Optimum Structural Design of Tankers using Multi-Objective Optimization Technique, PhD. Thesis, Seoul National University.



< 나 승 수 >



< 전 형 근 >