

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 34 卷 第 4 號 1997年 11月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 34, No. 4, November 1997

## 無蓋型 콘테이너船의 中央斷面 最適構造設計

김기성\*, 정한신\*\*

### Optimum Midship Section Design of Hatchcoverless Container Ship

by

K. S. Kim\* and H. S. Jong\*\*

#### 요 약

무개형 콘테이너 선박에 대한 구조 설계 과정에 최적화 기법을 적용하여 최적 구조 시스템을 개발하였다. 중앙 단면 설계 기법으로는 L.R. rules을 이용하였고 목적 함수는 중앙 단면 모든 종강도 부재 단면적의 합, 즉 최소 중량을 선택하였다. 최적화 기법으로는 직접탐색법에 SUMT방법을 결합시켜 사용하였다. 최소 중량 설계를 수행한 결과 실적선과 비교하여 8.0%의 중량감소를 보인 최적화 설계를 도출하였다.

#### Abstract

The paper is mainly concerned with the applications to develop an optimum structural design procedure for hatchcoverless container ship. L.R. rules are applied to determine the scantlings of the longitudinal members. As for an object function of midship section design, the total sectional area of all the longitudinal members for midship section is selected. The SUMT procedure combined with direct search method is applied to the solution of nonlinear optimum design problem to find a optimum midship section arrangement. The results of optimization study show that the weight of model ship may be saved about 8.0% per unit length.

---

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9)

접수일자 : 1996년 1월 25일, 재접수일자: 1997년 8월 18일

\* 정회원, 인하대학교 선박해양공학과

\*\* 정회원, 대우중공업(주) 영업설계부

## 1. 서 론

최근 선체 구조의 형태 변화는 예상되어지는 환경 조건에 적합하고, 경제성이 높은 선박 구조의 개발 방향으로 급속히 변모하고 있으며, 앞으로 개발될 컨테이너 선박의 구조 혁신으로 더 많은 컨테이너를 적재하고 화물의 적재와 하역을 더 짧은 시간 내에 마칠 수 있도록 변모되어 가고 있다 [1]. 이러한 경향으로 기존 컨테이너선의 구조 개념과 달리 창구덮개를 없애는 무개형 컨테이너선의 구조 개념이 차세대 컨테이너선 수송의 혁신적인 방향으로 제시되고 있으며 일반 컨테이너선과 비교할 때 무개형 컨테이너선 개념은 기항 시간을 감소시켜 운항 효율을 높이고 관련 자재 및 인원이 절감됨으로서 전체적인 운항 경비를 절감할 수 있다. 무개형 컨테이너선 개념은 1970년대 중반부터 일부 개략적인 개념 정도만 거론되어 오다가 세계 최초로 300 TEU와 3,500 TEU급 무개형 컨테이너선들이 각각 1990년 8월과 1991년 12월 일본에서 건조되어 선주에게 인도되면서 해운 및 조선 업계에 큰 관심을 불러 일으켰다.

운항 효율성과 경제성 측면에서 볼 때 무개형 컨테이너선의 개념은 항해 거리가 짧은 단거리 루트와 기항 빈도 수가 빈번하고 하역 조건이 좋은 곳에서 효과가 극대화된다고 볼 수 있다. 이러한 지역으로는 유럽 경제권과 신흥 경제권을 형성하고 있는 극동과 동남 아시아 지역이 대체적으로 효과가 크다고 본다. 이들 지역은 항해 거리와 기항 횟수, 항구 조건 및 교환물량등으로 1,500~2,000 TEU급 컨테이너선의 취항율이 제일 높고 가장 적합한 지역이라 볼 수 있다[2,3,4].

이에 따라 본 연구에서는 운항 효율성과 경제성이 높은 동남아 항해에 응용 가능한 2,000 TEU급 컨테이너선을 모델선으로 선정해서 최소 선체 중량 설계를 수행하여 이를 실적선과의 비교하였으며, 중앙 단면의 각 종강도 부재의 강재 성질의 변화에 따라 중량 변화의 특성을 보였다. 그리고, 선체 중량과 관련된 강재비, 즉 중앙 단면을 구성하는 종부재의 평판과 보강재의 값도 산출하여 단위길이당 강재비를 계산하도록 하였다.

## 2. 선체 중앙 단면의 최적 설계

### 2.1 최적화 기법의 선정

일반적으로 모든 문제에 적합한 최적화 기법은 존재하지 않는다. 따라서 수많은 최적화 기법 중에서 가장 효율적인 최적화 기법을 선택한다는 것은 어려운 점이 많다. 특히, 선체 구조물과 같이 복잡한 형태에서 얻어진 목적 함수와 제한조건식은 매우 복잡한 비선형을 포함하고 있으며, 도출된 해의 정확성 및 효율성을 고려해야 하기 때문에 각각의 문제에 적합한 최적화 기법을 선택을 하여야 한다.

구조 설계에 적용된 최적화 기법을 살펴보면, SUMT와 결합하여 사용한 직접 탐색법이 주로 많이 사용된다[5,6,7,8]. 따라서 본 연구에서는 선체 구조 설계시 최적화 기법을 적용하기 위해서는 비선형 목적 함수 및 제한조건식을 가진 문제에 대해서 최적해를 도출하는 효율, 신뢰도 및 일반성이 비교적 높은 직접탐색법중에서 Nelder and Mead Simplex Method 와 Hooke and Jeeves Method[9,10]를 선정하였으며 SUMT의 External Penalty Function Method[11]를 결합한 방법이 사용되었다.

### 2.2 선급규칙에 의한 중앙 단면 최적설계

선체 구조 부재의 치수 결정은 중앙 단면의 계산으로부터 시작되며 선급규칙에서 요구한 종강도를 만족시키는 반복 작업이기 때문에 선체에서 종강도는 강도 평가상 가장 중요한 척도이다. 설계 과정으로는 선급규칙과 설계 개념에 따라 단면의 형상 결정 및 부재 배치를 행한 후 각 부재의 치수를 선급규칙에 의해 계산한 후 단면 계수를 계산하여 종강도 요구 조건이 만족될 때까지 부재의 치수를 선급규칙에 따라 가감하는 반복 작업이다.

### 3.2 중앙 단면의 초기 설계에 대한 가정

최소 중량의 중앙 단면 설계의 정식화를 위하여 다음과 같이 가정을 하였다.

(1) Lloyd's 선급 규칙을 적용하여 종강도 부재 치수를 결정함에 있어서 local scantling reduction factor, 즉  $F_L$  및  $F_B$ 의 적절한 초기치 선정이 필요하다. 따라서 초기에 유사한 크기와 형태를 갖는 선박에서의 값을 이용할 수 있도록 하였으며, 이들 값을 주지 못하는 경우에는 다음 식을 이용하여 처리된다.

$$F_B = \begin{cases} 0.00038 \times L^2/D & \text{for } L^2/D \leq 2632 \\ 1.0 & \text{for } L^2/D > 2632 \end{cases}$$

$$F_D = \begin{cases} 0.0004545 \times L^2/D & \text{for } L^2/D \leq 2200 \\ 1.0 & \text{for } L^2/D > 2200 \end{cases}$$

(2) 보강재의 단면 계수는 표준 rolled angle의 수치와 유효폭(effective breadth)을 관련시켜 바로 계산된다. 단, 필요한 단면 계수가 유효폭을 포함한  $300 \times 90 \times 13/17 I.A.$ 의 실제 단면 계수 이상인 것은 Built-up으로 사용하는 것을 원칙으로 한다.

(3) 갑판상의 종 보강재는 갑판 두께와 같은 flat bar를 사용한다.

(4) 철판의 두께는 0.5 mm간격으로 변화시킨다.

### 2.4 목적 함수

최적 중앙 단면의 단면 계수는 각 종보강재의 단면적을 목적 함수로 하여 다음과 같이 표시된다.

$$F = td \times (BT + SH) + \sum_{i=1}^{NT} t_i \times b_i$$

$$+ \sum_{j=1}^{NL} AL_j + \sum_{k=1}^{NG} t_k \times DBH$$

$$+ 0.5 \times t_c \times DBH$$

### 2.5 설계 변수

중앙 단면의 종부재 치수 결정시 중량에 큰 영향을 주는 인자는 각 종보강재의 간격으로서 다음과 같이 6개의 설계 변수를 선택하였다.

td	Thickness of deck plate
BT	Width of deck plate
SH	Width of the Sheerstrake
$t_i$	Width of the plate (except deck, side&center girder plates)
$b_i$	Thickness of the plate
NT	Numbers of the plate member
NL	Numbers of the longitudinal
AL	Sectional area of longitudinal
NG	Numbers of Side girder
$t_k$	Plate thickness of the K-th Side girder
DBH	Double bottom height
$t_c$	Plate thickness of the C.L girder

- X(1) : Spacing of longitudinals (in torsion box)
- X(2) : Thickness of longitudinals (in torsion box)
- X(3) : Height of the longitudinals (in torsion box)
- X(4) : Spacing of the upper turn of bilge longitudinals
- X(5) : Spacing of the longitudinal Between upper turn of bilge and D/2 from base
- X(6) : Spacing of the longitudinal above D/2 from base

### 2.6 제한 조건

종강도 부재 치수 결정시에 제한 조건을 Lloyd's선급규칙에 의하여 결정된 요구치 이상으로 규제하여 제한 조건으로 정하였다.

$$g_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, 15)$$

Where.

- g1-4 :  $X(i) / S_{min} - 1$
- g5-8 :  $1 - X(i) / S_{max}$
- g9 :  $X(2) \times 18 \times \sqrt{k} / X(3) - 1$
- g10 :  $1.05 - X(2) \times 18 \times \sqrt{k} / X(3)$

- g11 :  $1 - ZDLR/ZDL$
- g12 :  $1/FB - 1$
- g13 :  $1/FD - 1$
- g14 :  $ZB/ZBR - 1$
- g15 :  $ZD/ZDR - 1$

k : Higher tensile steel factor of deck.

X(i) : Spacing of the longitudinals.

Smin, Smax : Constraints of maximum or minimum spacing of longitudinals.

ZDLR, ZDL : Rule required and actual deck longitudinal section modulus respectively.

FB, FD : Local scantling reduction factor for hull members below and above N.A respectively

ZB, ZD : Actual hull midship section modulus at bottom and deck respectively.

ZBR, ZDR : Required minimum hull midship section modulus at bottom and deck respectively.

### 2.7 최소 중량 설계를 위한 프로그램의 구성

프로그램은 먼저  $F_B, F_D$ 의 가정후, 선체 중앙 단면의 모든 종강도 부재에 대해서 Lloyd's Rule[12]을 적용해 각각의 구조 부재의 치수를 결정한다. 결정된 각각의 종강도 부재를 적용해서 Longitudinal Strength Calculation Routine에서  $F_B, F_D$ 를 계산한 후 선체의 단면 계수가 기준 criteria를 만족할 때까지 반복 계산한다.

Fig. 1에는 위와 같은 최적설계 과정을 표시하였고, Fig. 2에는 중앙단면의 최적설계를 위한 단면의 형상과 요소의 번호를 예시하였다.

### 2.8 선체 중앙 단면의 종강도 부재에 관한 재료비 산정

중앙 단면의 각각의 종강도 부재에 대한 강재의 성질 즉, 연강과 고장력강의 사용양에 따라 선가가 틀려지게 된다. 고장력강을 선체 구조에 사용함으로써 얻어질 수 있는 중량의 감소량과 고장력

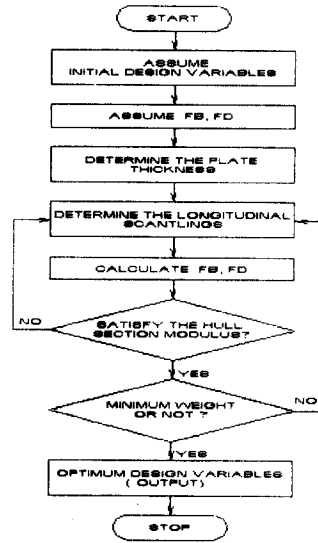


Fig. 1 Optimum midship section design procedure

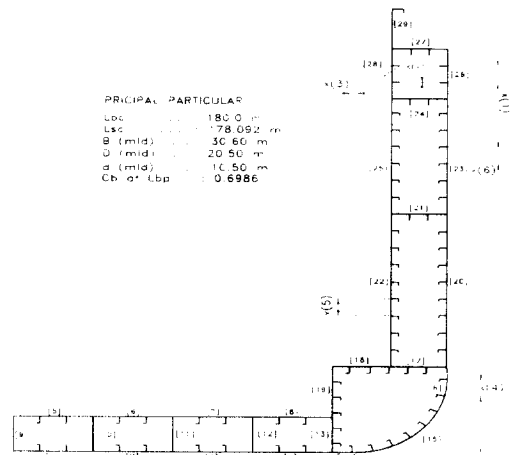


Fig. 2 Shape and element numbers for midship section design

강의 사용으로 인한 강재비 증가의 변화를 고려해야 한다. 따라서, 중앙 단면 종부재의 전체 강재비를 결정하기 위해 서로 다른 항복응력을 갖는 강재를 각 종강도 부재에 사용하여 비교하였으며, 최적 설계에서 얻은 각 종부재의 수치 및 강재의

중량이 강재비의 결정에 사용되었다.

선급규칙에 따른 강재의 항복응력과 평판의 두께 및 각 항목의 위치에 따라 강재의 등급과 가격이 결정되게 된다.

### 3. 계산 결과 및 고찰

계산 결과로서 실적선 2,000TEU 무개형 컨테이너선의 종강도 부재의 최소 중량 설계 결과와 실제 수치와의 비교를 한 것이 Table 1이며 단위 길이당 8.0 %정도의 선체 중량이 감소되는 설계가 가능함을 볼 수 있다.

Table 2는 종강도 부재에 사용된 재료를 서로 다른 항복 응력을 갖는 강재를 사용해 최소 중량 설계를 한 결과로서 최적 설계시 설계 변수의 종보강재 간격은 사용된 강재의 재질에 따라 최적 간격 역시 변한다는 것을 알 수 있다. Fig. 3는 Table 2의 각각의 경우에 대한 중량과 강재비의 변화를 모든 중앙 단면의 종강도 부재가 연강일 경우 중량과 강재비를 1.0으로 기준 하여 강재의 재질이 바뀔때 따라 각각의 경우에 따른 중량과 강재비의 변화율을 나타낸 것이다.

Table 1 Comparison of OTC(program) to actual design for longitudinal spacing and weight variation.

	ACTUAL	OTC(program)	
		SIMPLEX	HOOKE& JEEVES
Frame Space(mm)	850	850	850
Floor Space (m)	3.15	3.15	3.15
Torsion Box long. Spacing(mm)	925	850	885
Torsion Box long. Thickness (mm)	26	23.5	21.5
Torsion Box Longi. Height (mm)	400	335	340
Upper turn of Bilge Longi Spacing(mm)	850	785	770
Side Shell Longi. (AboveD/2)(mm)	868	785	775
Side Shell Longi. (BelowD/2)(mm)	868	785	795
Section Modulus (Deck)(m <sup>3</sup> )	11.745	10.047	9.994
Section Modulus (Bottom)(m <sup>3</sup> )	20.046	18.29	18.24
Weight(ton/m)	22.766	20.96	20.832
Ratio (%)	100	92.02	91.5

Table 2 Comparison of results of 2000TEU hatchcoverless container ship for optimum design using various materials

Case Number	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Variable	All Mild	DK HTS 32	DK Btm HTS32	All HTS 32	DK HTS 36	DK Btm HTS36	All HTS 36
DK Thickness (mm)	36.5	21.5	22.5	22.5	19.5	19.5	20.5
DK Longi Height (mm)	660.0	340.0	350.0	325.0	275.0	285.0	300.0
DK Longi. space (mm)	985.0	950.0	925.0	920.0	930.0	850.0	885.0
Lower side shell space(mm)	765.0	770.0	765.0	785.0	770.0	770.0	775.0
Upper side shell space(mm)	780.0	770.0	780.0	810.0	770.0	770.0	760.0
Rule Req. M of Inertia(m <sup>4</sup> )	68.56	68.56	68.56	68.56	68.56	68.56	68.56
Rule Req. SM at Deck (m <sup>3</sup> )	12.83	10.03	10.03	10.03	9.24	9.24	9.24
Rule Req. SM at Btm (m <sup>3</sup> )	12.83	12.83	10.03	10.03	12.83	9.24	9.24
Actual Moment of Inertia(m <sup>4</sup> )	163.41	135.67	134.64	133.25	127.11	126.89	125.48
Actual Section M at Deck (m <sup>3</sup> )	13.02	10.15	10.11	10.08	9.33	9.36	9.23
Actual Section M at Btm (m <sup>3</sup> )	20.54	19.01	18.71	18.29	18.46	18.25	17.91
Weight (ton/m)	24.47	22.01	21.35	20.87	21.54	20.93	20.15
Cost (US\$/m)	10974	10191	10121	9949	9938	10002	9777

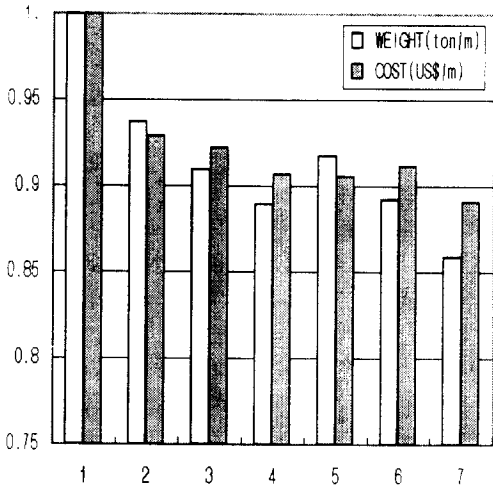
(a) Nelder and mead simplex method

Case Number	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Variable	All Mild	DK HTS 32	DK Btm HTS32	All HTS 32	DK HTS 36	DK Btm HTS36	All HTS 36
DK Thickness (mm)	34.5	22.5	29.5	21.5	20.5	19.5	24.5
DK Longi Height (mm)	585.0	360.0	240.0	340.0	275.0	300.0	135.0
DK Longi. space (mm)	910.0	865.0	910.0	950.0	870.0	890.0	895.0
Lower side shell space(mm)	785.0	765.0	785.0	810.0	770.0	770.0	795.0
Upper side shell space(mm)	785.0	790.0	785.0	765.0	770.0	770.0	790.0
Rule Req. M of Inertia(m <sup>4</sup> )	68.56	68.56	68.56	68.56	68.56	68.56	68.56
Rule Req. SM at Deck (m <sup>3</sup> )	12.83	10.03	10.03	10.03	9.24	9.24	9.24
Rule Req. SM at Btm (m <sup>3</sup> )	12.83	12.83	10.03	10.03	12.83	9.24	9.24
Actual Moment of Inertia(m <sup>4</sup> )	163.72	136.31	134.85	133.04	126.16	126.46	126.47
Actual Section M at Deck (m <sup>3</sup> )	12.99	10.17	10.08	10.06	9.26	9.32	9.41
Actual Section M at Btm (m <sup>3</sup> )	23.67	19.20	18.94	18.23	18.84	18.24	17.97
Weight (ton/m)	23.96	22.02	21.51	20.96	21.43	20.87	20.32
Cost (US\$/m)	11059	10174	10162	10028	9897	9979	9785

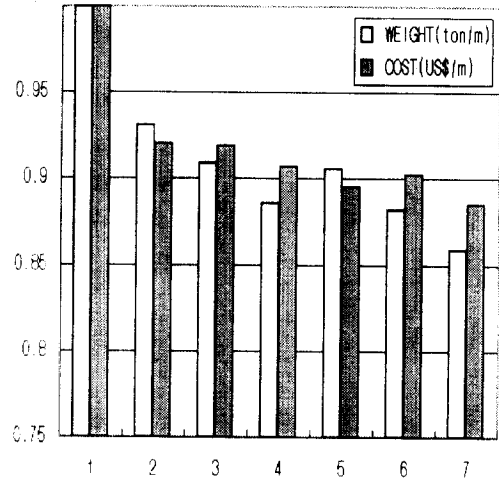
(b) Hooke and jeeves pattern search method

CASE	1	2	3	4	5	6	7
WEIGHT (ton/m)	1.	0.9368	0.9094	0.8891	0.9176	0.892	0.8584
COST (US\$/m)	1.	0.9286	0.9223	0.9066	0.9056	0.9114	0.8909

CASE	1	2	3	4	5	6	7
WEIGHT (ton/m)	1.	0.9306	0.9089	0.8856	0.9057	0.8819	0.8586
COST (US\$/m)	1.	0.9200	0.9189	0.9068	0.8949	0.9023	0.8848



(a) Nelder and mead simplex method



(b) Hooke and jeeves pattern search method

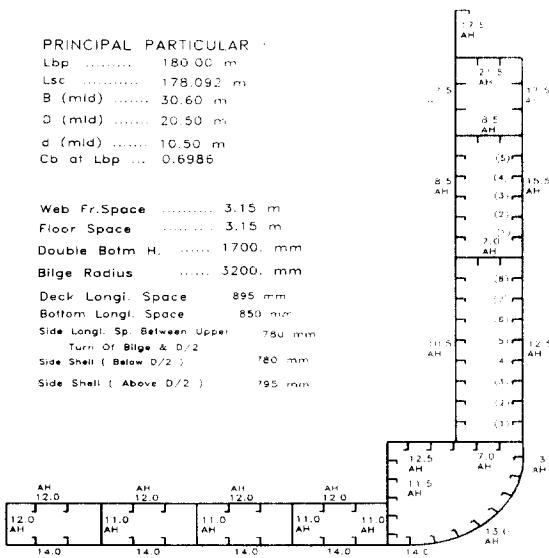
Fig. 3 Weight and cost influences due to higher tensile steel used

\*\* MIDSHIP SECTION PLAN \*\*  
DATE : MAY 20. 1995

PRINCIPAL PARTICULAR

Lbp ..... 180.00 m  
Lsc ..... 178.092 m  
B (mid) ..... 30.60 m  
D (mid) ..... 20.50 m  
d (mid) ..... 10.50 m  
Co at Lbp ... 0.6986

Web Fr.Space ..... 3.15 m  
Floor Space ..... 3.15 m  
Double Botm H. .... 1700. mm  
Bilge Radius ..... 3200. mm  
Deck Longi. Space ..... 895 mm  
Bottom Longi. Space ..... 850 mm  
Side Longi. Sp. Between Upper: 750 mm  
Turn Of Bilge & D/2 .....  
Side Shell ( Below D/2 ) : 780 mm  
Side Shell ( Above D/2 ) : 795 mm



LONGL. DIMENSION

11	300x 90x 11.0/16.0
12	300x 90x 11.0/16.0
13	300x 90x 11.0/16.0
14	300x 90x 11.0/16.0
15	250x 90x 12.0/16.0
16	250x 90x 12.0/16.0
17	250x 90x 12.0/16.0
18	300x 90x 11.0/16.0
19	300x 90x 11.0/16.0
20	(1) 250x 90x 12.0/16.0
21	(2-6) 250x 90x 10.0/15.0
22	(7-8) 200x 90x 9.0/14.0
23	250x 90x 10.0/15.0
24	(1) 150x 90x 12.0/12.0
25	(2-5) 150x 90x 9.0/9.0
26	340x 21.5 F.B.
27	340x 21.5 F.B.
28	340x 21.5 F.B.
29	340x 21.5 F.B.

MATERIAL FACTOR

	PLATE	LONGL.
DECK	0.778	0.778
SIDE SHELL	0.778	0.778
INNER BTM.	0.778	0.778
BOTTOM	0.778	0.778
GIRDER	0.778	

INTRODUCTORY REMARKS

12.5 : PLATE THICKNESS  
20 : ELEMENT NO.

Fig. 4 Structural plan of midship section for 2,000TEU hatchcoverless container ship

그 결과, 모든 중부재를 연강으로 사용한 것보다 부분적으로 항복응력 32kg/mm<sup>2</sup>인 고장력강을 사용했것이 중량 감소뿐 아니라 강재비 역시 현저히 감소한다. 그러나 모든 중부재를 항복응력 36kg/mm<sup>2</sup>의 고장력강을 사용했을 경우, 부분적 고장력강의 사용에 비해 중량 감소는 보이지만 강재비면에서는 큰 변화가 없었다. 즉 고장력강을 선체 구조에 사용함으로써 얻어질 수 있는 중량의 감소량과 고장력강의 강재비 증가의 변화를 고려한 설계가 필요함을 알 수 있다. 이상 최적화를 수행한 중앙단면의 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

#### 4. 결 론

최적화 기법을 선급규칙의 규정과 연결하여 종강도 부재의 수치 및 종강도를 만족하는 각 중보 강재의 간격을 변화시켜 가면서 목적 함수로 최소 중량을 택해 최적 설계를 수행한 결과 실적선과 비교하여 중량이 약 8.0%정도 감소함을 보였다. 여기서 보인 중량 감소는 실적선을 이상화한 모델에 종강도만을 고려한 설계이므로 세밀한 구조 해석을 통한 설계인 실적선과는 다소 오차가 발생할 수 있다는 점을 감안하더라도 최적화 기법을 이용한 선체 종강도 해석 프로그램의 유용성을 보였다. 즉, 초기 설계 단계에서 설계자에게 개략적인 부재 배치의 윤곽을 보여 줌으로서 설계 시간의 단축과 다음 단계의 상세 구조 설계에 필요한 자료로서 사용되어 최종 설계까지 쉽게 도달할 수 있도록 할 수 있을 것이다.

본 프로그램은 단일 목적 함수로서 최소 중량을 갖는 단면이 결정되었을 때 그 단면의 강재비만을 고려하였다. 그러나 앞으로의 연구 방향은 최근 인건비의 상승 등을 고려할 때 최소 중량과 더불어 최저 건조비가 동시에 고려되는 다목적 함수의 최적화 기법에 관한 연구가 요망된다.

#### 후 기

본 연구는 1994년도 인하대학교 연구비 지원에 의해 수행되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 이재욱, "신구조 방식 컨테이너선의 구조개발을 위한 기초 연구", 한국과학재단, 1994.
- [2] 朴命圭, "2000TEU급 무개형 컨테이너선의 설계"
- [3] 박명규, 신영식, "무개형 컨테이너선의 설계개발에 관하여", 한국항만학회지, 제 5권, 제 1호, 1991.
- [4] 최길선, "한라 2000TEU급 OPEN TOP CONTAINER선 소개", 대한조선학회, 제 30권, 제 1호 1993.
- [5] 신종계, "최적화기법을 이용한 선체중앙단면의 최소중량설계", 대한조선학회지, 제 17권 제 4호, 1980.
- [6] Lu, J.F., "A Study on Optimum Structural Design of Midship Section", M.Sc. Thesis, Inha University, 1991.
- [7] Lu, J.F., "A Study on Optimum Structural Design of Midship Section of Double Hull Tanker", TEAM-TAIPEI 94, pp. 385-396, 1994.
- [8] 나승수, 민계식, 엄항섭, 신동희, "유한요소법에 의한 횡강도부재의 최소중량설계", 대한조선학회지, 제 22권, 제 3호, 1985.
- [9] Reklaitis, G.V. et al, "Engineering Optimization - Methods and Applications", John-Wiley, London, 1983.
- [10] Parson, M.G., "Optimization Methods For Use In Computer Aided Ship Design", STAR Sympo., SNAME, 1975.
- [11] Gallagher, R.H. at al (Eds.), "Optimum Structural Design : Theory and Applications", John-Wiley, London, 1973.
- [12] Lloyd's Register of Shipping, "Rules and Regulations for the Classification of Ships", 1994.