

論 文

大 韓 造 船 學 會 誌
第22卷 第3號 1985年 9月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 22, No. 3, September 1985

유한요소법에 의한 횡강도부재의 최소중량설계

나승수* · 민계식* · 엄항섭* · 신동희*

Minimum Weight Design of Transverse Strength Member by
Using Finite Element Method

by

Seung Soo Na* · Keh Sik Min* · Hang Sub Urm* · Dong Hee Shin*

Abstract

The optimum design of the transverse strength member was carried out with respect to the minimum hull weight taken account of the 2-dimensional analysis by using Finite Element Method.

The optimum sizes of the member such as web height, web thickness, lower flange breadth, lower flange thickness, radii, were calculated by using Hooke and Jeeves direct search method.

The optimum structure satisfies requirements to allowable bending and shear stresses in each strength member.

The optimum design results were compared with the practical ship design.

The optimum design saves the hull weight than that of practical design amounts to 9.6 % of that.

1. 서 언

최근 해운 불경기 및 조선 시장의 국제 경쟁이 심화됨에 따라 각 조선소에서는 연료 경제 선형개발과 선체 경량화 연구에 전력을 기울이고 있다. 이는 선박 운영 효율을 향상시키기 위해서 뿐만 아니라 선가 절감 등으로 경쟁력 향상을 위해서 절대로 필요한 것이다.

본사에서도 이와 같은 세계적인 추세에 따라 선체 경량화 연구를 추진하고 있는바, 이미 Lloyd Rule에 의한 횡강도 부재의 최적 설계를 수행하여 선체구조 연구회에서 발표한 바 있으며 직접 계산에 의한 횡강도 부재의 최적 설계도 수행하고 있는 중이다.

본 논문에서는 횡강도 부재의 설계시 최적화 이론의 적용 및 직접 계산에 의한 설계를 다음과 같이 수행한 후 종래의 방법에 의한 설계와의 차이를 알아 보고자 한다.

먼저 선체 중앙부를 유효폭 개념을 이용하여 한 web frame만을 떼어내 2차원으로 modelling하였으며 bracket이 붙은 부분은 span point 개념을 이용하여 강성을 크게 주어 등가의 beam으로 치환하였다.

치환한 model에 화물에 의한 하중 및 유체에 의한 부력을 고려한 후 유한 요소법을 사용하여 부재내에서 발생되는 굽힘응력 및 전단응력을 계산하였다.

다음에 최적화 이론을 선체 구조설계에 적용하기 위해 한 web frame당 신작 중량을 목적 함수로 하고 beam의 허용굽힘응력 및 허용전단응력과 web의 허용

接受日字：1985年 5月 16日，再接受日字：1985年 8月 1日

* 대우조선(주)

좌굴응력을 제한 조건으로 하였으며 각 부재의 단면치수를 설계변수로 선택하였다.

그리고 유한요소법에서 계산한 beam의 굽힘응력 및 전단응력과 web의 좌굴응력이 허용응력 범위에서 선각 중량을 최소로 하기 위해 최적 설계기법의 일종인 Hooke & Jeeves direct search method를 이용하여 최적 설계 program을 구성하였다.

이 program을 이용하여 단면치수를 변화시키면서 유한 요소법에 의해 부재응력을 계산하고 선각 중량이 최소가 될때까지 반복 수행하여 최적인 부재의 단면치수를 찾고자 하며 실적선의 선각중량 및 단면 치수와 비교 검토하고자 한다.

2. 연구개요

Fig. 1에 보인것 같이 유한요소법에 의해 부재의 응력을 계산하고 최적설계 program을 사용하여 이 응력과 web의 좌굴응력이 허용응력범위에서 설계변수를 변화시켜 최소 중량이 되는 각 부재의 치수를 결정한다.

2.1. 유한요소법에 의한 횡강도 해석

2.1.1. 선체 중앙부의 web frame으로의 치환

선체 중앙부의 횡강도를 해석하기 위해서는 Fig. 2에서 보인것 같이 유효폭 이론을 이용하여 한 web

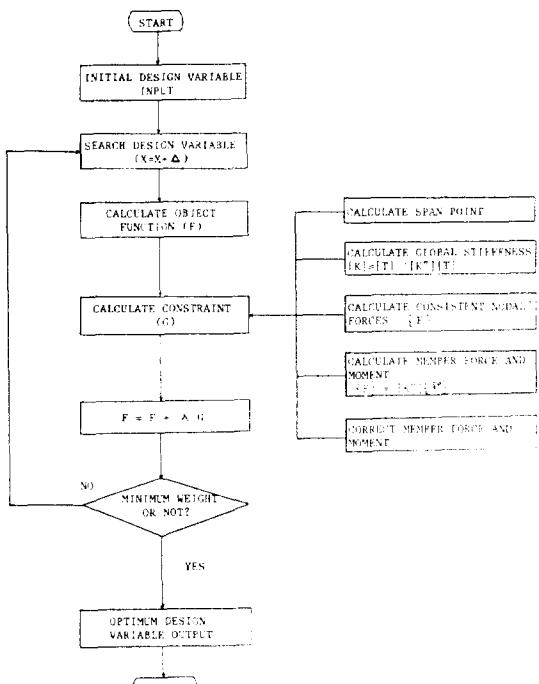


Fig. 1 Minimum weight design flow

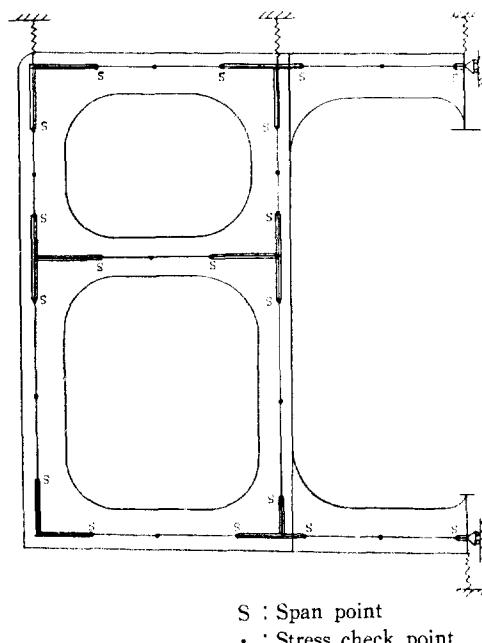
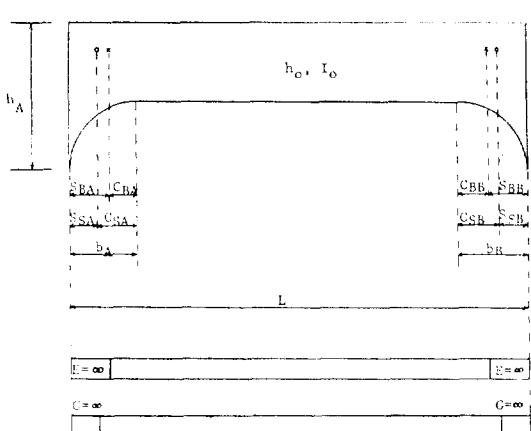


Fig. 2 Modelling actual midship to beam model

frame 만큼을 떼어내 종강도 부재인 선체외판 및 종격벽을 I beam의 flange로 보고 I 단면을 형성하는 web frame으로 치환하면 계산이 용이하다.

또한 bracket이 붙은 부분은 span point를 이용하여 bracket 부분의 강성을 크게주어 등가의 beam으로 치환한다.

2.1.2. Span point 결정[1]



h_0, h_A : web height

I_0 : 굽임 단면 보의 2차 moment

E : Young's modulus

G : shear modulus

Fig. 3 Span point definition

a) 굽힘에 의한 span point

$$\frac{S_{BA}}{b_A} = 0.724 - \frac{0.724h_0}{0.724h_A + 0.726h_0} \quad (1)$$

b) 전단에 의한 span point

$$\frac{S_{SA}}{b_A} = 1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_0}{R} - \frac{2(h_0/R)(1+h_0/R)}{\sqrt{(h_0/R)^2 + 2h_0/R}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{1 + \frac{2R}{h_0}} \quad (2)$$

$$[K^*] = \begin{pmatrix} \frac{EA}{l} & & & \\ & \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & & \\ & 0 & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & -\frac{(4+\phi)EI}{l(1+\phi)} \\ & & & \text{SYM.} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} \\ & -\frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & 0 & -\frac{12EI}{l^3(1+\phi)} \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & -\frac{(2-\phi)EI}{l(1+\phi)} & 0 & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & -\frac{(4+\phi)EI}{l(1+\phi)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\phi = 12EI/GA_s l^2$, A_s : Effective shear area

2.1.4. 등가 절점력 계산

분포 하중을 등가 절점력으로 나타내면 다음과 같다.

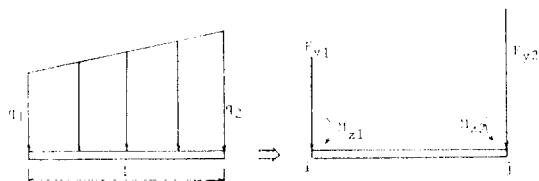


Fig. 4 Consistent nodal force

$$\left. \begin{aligned} F_{y1} &= \frac{l}{20}(7q_1 + 3q_2) \\ F_{y2} &= \frac{l}{20}(3q_1 + 7q_2) \\ M_{z1} &= \frac{l^2}{60}(3q_1 + 2q_2) \\ M_{z2} &= -\frac{l^2}{60}(2q_1 + 3q_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.1.5. 하중보정 [3]

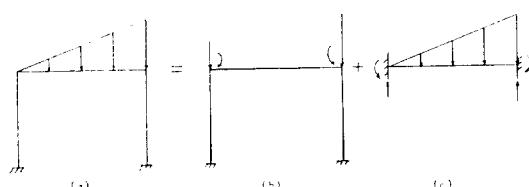


Fig. 5 Load correction

Fig. 6에서 보인 것 같이 분포 하중을 받는 (a) 경우의 하중을 (b)와 같이 등가절점력으로 치환하는 과정

위에서 구한 S_{BA} 와 S_{SA} 중 작은 값을 span point로 결정한다.

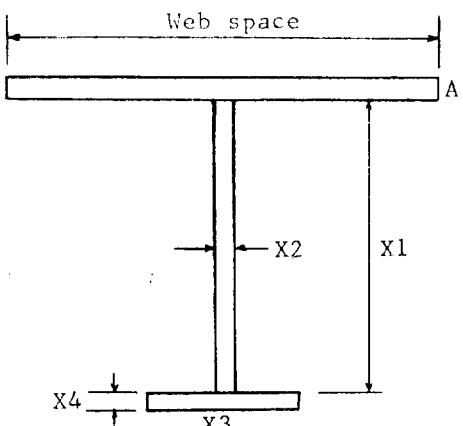
2.1.3. 축 강성 및 전단 강성을 고려한 강성행렬 [2]

전단을 고려한 frame 구조물의 강성행렬은 $[K^*]$ 로 표시할 수 있다.

에서 실제하중 조건인 (a)를 정확히 표현하지 못하기 때문에 (b)의 하중하에서 유한 요소법에 의해 각 절점력을 계산한 후에 (c) 경우의 반력을 해석적으로 구해 계산한 절점력과 합하면 (a) 경우의 분포 하중을 받을 때의 정확한 해석이 된다.

즉 (a)=(b)+(c)가 된다.

2.2. 유한 요소법에 의한 횡강도 부재의 최소 중량설계



A : 외판의 단면적

X1 : web의 높이

X2 : web의 두께

X3 : 하부 flange의 폭

X4 : 하부 flange의 두께

Fig. 6 Design variable

2.2.1. 설계변수(X_i)

Fig. 7에서 보인 바와 같이 설계변수를 줄이기 위해 상부 flange로 작용하는 외판은 기존 설계 도면에서의 두께를 사용하였으며 길이는 web space를 사용하여 A 를 결정하였다.

설계변수로는 web의 높이 및 두께, 하부 flange의 폭과 두께, 폭면부의 반경이며 각 부재마다 설계변수는 달리 했다.

2.2.2. 목적함수(F)

목적함수는 각 부재의 균일 단면부의 단면적에 길이를 곱한 값과 bracket의 면적에 web 두께를 곱한 값과의 총합이다.

$$F = \sum_{i=1}^N \{(A + X_1 \cdot X_2 + X_3 \cdot X_4) \times DL\} + \sum_{j=1}^M (A_B \cdot X_2); \quad (5)$$

N : 부재갯수

M : bracket이 붙은 부분의 갯수

A_B : bracket이 붙은 부분의 면적

DL : 부재길이

2.2.3. 제한 조건(G)

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_i \leq \sigma_a \quad (i=1, 2, \dots, N) \\ \tau_j \leq \tau_a \quad (j=1, 2, \dots, N) \\ \sigma_B \geq \sigma_N \\ \sigma_{WBj} \geq \sigma_{cr} \quad (j=1, 2, \dots, N) \end{array} \right\} \quad (6)$$

여기서 σ_B : Strut의 압축 좌굴 응력

σ_N : Strut의 압축 응력

σ_a : Allowable bending stress

$$(\sigma_a = 15 \text{ kg/mm}^2)$$

τ_a : Allowable shear stress

$$(\tau_a = 12 \text{ kg/mm}^2)$$

σ_i : 부재에 걸리는 bending stress

τ_j : 부재에 걸리는 shear stress

σ_{WBj} : web의 압축좌굴응력

$$(\sigma_{WBj} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2)$$

σ_{cr} : web의 허용좌굴응력 ($\sigma_{cr} = 10 \text{ kg/mm}^2$)

K : 좌굴 계수

t : web의 두께

b : longi. space

3. 최적설계 program의 구성

3.1. 수식화

함수 F 가 최소 또는 최대가 되는 n 차원상의 점 $X \in R^n$ 을 찾는 문제를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

f, g, h 가 연속이고 미분 가능한 함수일 때

설계변수가 $X^* \in R^n$ 상에 존재하고

제한조건으로 $\begin{cases} g(x) \geq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases}$ 을 만족하면서

목적함수 $F(x)$ 를 최소 또는 최대로 하는 최적해는 $X^* = \{x \mid \min. F(x), g(x) \geq 0, h(x) = 0\}$ 으로 나타낼 수 있다.

3.2. 위반 함수법

설계변수가 제한 조건을 벗어나는 경우 설계 변수를 설계 가능 영역으로 넘겨주기 위해 다음과 같은 위반 함수법을 이용한다.

$$P(x, r_h) = F(x) - r_h \sum_{i=1}^m \min. \{g_i(x), 0\} \quad (7)$$

즉, $g_i(x) < 0$ 이면 제한 조건을 만족하지 않기 때문에 만족하지 않는 양이 목적함수 $F(x)$ 에 합해지므로 전체적인 함수값이 크게 된다.

따라서 $P(x, r_h)$ 가 최소가 되기 위해서는 $g_i(x) \geq 0$ 이 되어야 하며 $F(x)$ 도 최소가 되어야 한다.

여기서 r_h 는 response factor로서 보통 목적함수 $F(x)$ 값의 100,000배로 잡아 제한조건의 영향을 크게 한다.

3.3. Hooke and Jeeves direct search method

3-3.1. Local search

출발점 $x_0 = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 에서

증분량 Δ 만큼 변화시켜

$$F(x_1 \pm \Delta_1, x_2, \dots, x_n) < F(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ 인 점을 } x_{01}$$

$$F(x_1 \pm \Delta_1, x_2 \pm \Delta_2, \dots, x_n) < F(x_1 \pm \Delta_1, x_2, \dots, x_n)$$

인 점을 x_{02}

⋮ ⋮

$$F(x_1 \pm \Delta_1, x_2 \pm \Delta_2, \dots, x_n \pm \Delta_n)$$

$$< F(x_1 \pm \Delta_1, x_2 \pm \Delta_2, \dots, x_{n-1} \pm \Delta_{n-1}, x_n)$$

인 점을 x_{0n} 으로 하여 x_{0n} 이 base point x_0 가 되어 pattern move 한다.

3.3.2. Pattern move

Base point를 중심으로 x_0 에서 \bar{x}_0 방향으로 투영시켜 새로운 점 x_1 을 구한다.

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = x_0 + 2(\bar{x}_0 - x_0) \\ \vdots \\ x_n = x_{n-1} + 2(\bar{x}_{n-1} - x_{n-1}) \end{array} \right\} \quad (8)$$

즉, pattern move하여 얻은 점 x_1 에서의 F_p 가 x_0 에서의 F 보다 작으면 global move에 성공한 것이다. 크면 실패한 것으로 다시 local search 상태로 돌아간다.

3.3.3. Global move(성공)

$$F_p < F \quad (9)$$

3.3.4. Local search(실패)

$$F_p > F \quad (10)$$

3.4. Flow chart

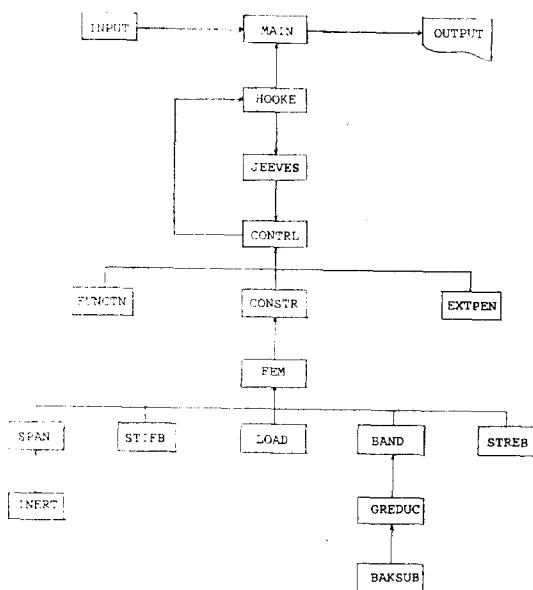


Fig. 7 Flow chart

- INPUT : 형상, property 및 설계 변수의 초기화 입력
- Hooke : JEEVES에서 구한 값을 base point로 하여 local search 및 pattern move 한다.
- JEEVES : Starting point 및 pattern move에서 일어진 점에서 local search 한다.
- CONTRL : Subprogram FUNCTN, CONSTR, EXTPEN을 호출한다.
- FUNCTN : 목적 함수 값을 계산한다.
- CONSTR : 설계 변수가 제한 조건에의 위반 여부를 판단한다.
- EXTPEN : 설계 변수가 제한 조건에 위반되었을 때 선계 가능 영역으로 넘겨준다.
- FEM : 횡강도 해석을 하기 위한 subprogram을 호출한다.
- SPAN : Bracket의 형상에 따른 span point 위치를 계산한다.
- STIFB : 부재의 stiffness를 계산한다.
- LOAD : 하중 크기를 계산한다.
- BAND : Band matrix의 inverse를 구한다.
- STREB : 부재의 굽힘 moment, 전단력, bending stress, shear stress를 계산한다.
- INERT : 단면 특성치를 계산한다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1. 간단한 model의 응력 해석[5]

Program의 검증을 위하여 Fig. 9에서 보인 간단한

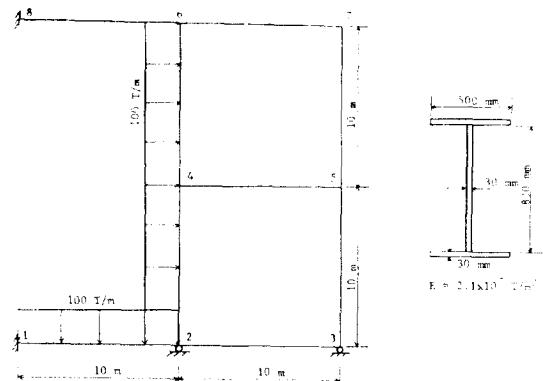


Fig. 8 Testing model

model의 응력해석 결과를 Table 1-2에 나타내었다.

여기서 SAP 6는 package program의 결과이며 S.D.M.은 slope deflection method를 이용한 결과이다.

Table. 1-2에서 보이는 것 같이 본 program의 결과는 SAP 6나 S.D.M.의 결과와 거의 비슷한 결과를 보여주고 있어 충분히 구조 설계에 이용될 수 있을 것이라고 생각된다.

4.2. 실선에서의 응력해석 및 최소 중량설계[4]

실선의 주요치수는 $L \times B \times D \times T = 307 \text{ m} \times 48.2 \text{ m} \times 25.5 \text{ m} \times 19.7 \text{ m}$ 이며 그 형상을 Fig. 10에 보였다.

경계조건은 선체의 center line에서의 대칭조건 및 절이 방향으로의 강성 요소 즉, side plate, inner bulkhead, bottom center girder 및 deck center girder의 강성을

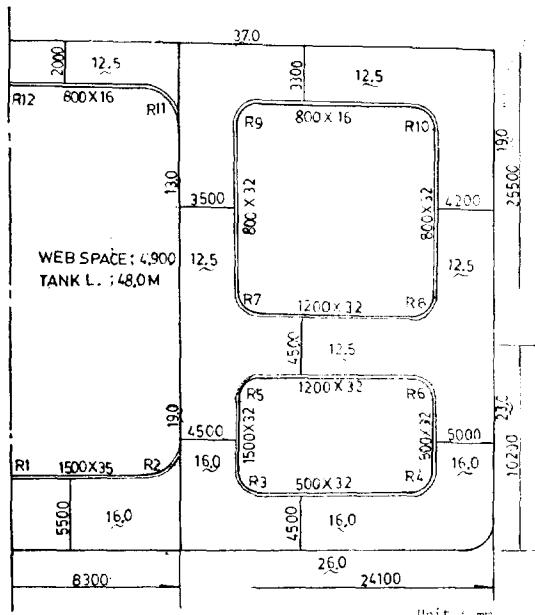


Fig. 9 Shape of actual midship (Model S-1)

Table 1 Moment distribution of test model

unit : ton·m

Node No.	1-2	2-1	2-3	3-2	2-4	4-2	2-5	5-3	4-5
SAP 6	547.2	1382.1	-833.6	989.1	2215.7	-597.4	989.1	-1367.1	-68.
S.D.M.	575.9	1379.	-821.	994.	2200.	-567.	994.	-1377.	-54.3
This Program	574.2	1382.	-833.6	989.1	2216.	-597.4	989.1	-1367.	-68.
Node No.	5-4	4-6	6-4	5-7	7-5	8-6	6-8	6-7	7-6
SAP 6	20.5	-529.4	1907.5	-1346.6	1047.2	377.	-792.1	1115.5	-1047.2
S.D.M.	4.8	-512.8	1900.	-1373.	1075.	357.8	-764.6	1136.	-1075.
This Program	20.5	-529.3	1908.	-1347.	1047.	377.	-792.	1116.	-1047.

sign convention

**Table 2** Shear force distribution of test model

unit : ton

Node No.	1-2	2-1	2-3	3-2	2-4	4-2	3-5	5-3	4-5
SAP 6	419.2	-580.8	-182.3	-182.3	781.3	-218.7	235.6	235.6	-8.9
S.D.M.	419.7	-580.3	-181.6	-181.6	776.7	-223.3	237.1	237.1	-5.9
This Program	419.2	-580.8	-182.3	-182.3	781.3	-218.7	235.6	235.6	-8.9
Node No.	5-4	4-6	6-4	5-7	7-5	8-6	6-8	6-7	7-6
SAP 6	-8.9	256.3	-743.7	-239.4	-239.4	116.9	116.9	216.3	216.3
S.D.M.	-5.9	258.7	-741.3	-244.8	-244.8	112.2	112.2	221.1	221.1
This Program	-8.9	256.3	-743.7	-239.4	-239.4	116.9	116.9	216.3	216.3

Table 3 Bending moment distribution of Model S-1 (case 1)

unit : ton·m

Node No.	1-2	2-1	2-3	3-2	2-4	4-2	3-5	5-3	4-5
SAP 6	20.9	-629.1	-1508.1	-3725.2	879.0	1473.8	-3725.2	-632.1	43.1
This Program	20.9	-628.6	-1513.	-3719.	884.9	1474.	-3719.	-642.5	36.9
Node No.	5-4	4-6	6-4	5-7	7-5	8-6	6-8	6-7	7-6
SAP 6	-588.0	1430.7	232.3	-1220.1	-1636.	51.7	153.4	385.7	-1636.
This Program	-583.8	1437.	236.1	-1226.	-1632.	51.8	153.2	389.3	-1632.

Table 4 Shear force distribution of Model S-1 (case 1)

unit : ton

Node No.	1-2	2-1	2-3	3-2	2-4	4-2	3-5	5-3	4-5
SAP 6	-68.6	200.8	-829.3	1176.9	345.9	-435.6	-990.1	183.4	49.5
This Program	-68.6	200.7	-830.2	1176.	347.2	-435.9	-988.1	185.5	48.7
Node No.	5-4	4-6	6-4	5-7	7-5	8-6	6-8	6-7	7-6
SAP 6	49.5	456.4	-115.7	-708.6	590.1	49.9	-70.6	-19.9	-176.2
This Program	48.7	458.8	-116.6	-709.3	589.4	49.9	-70.5	-19.3	-175.6

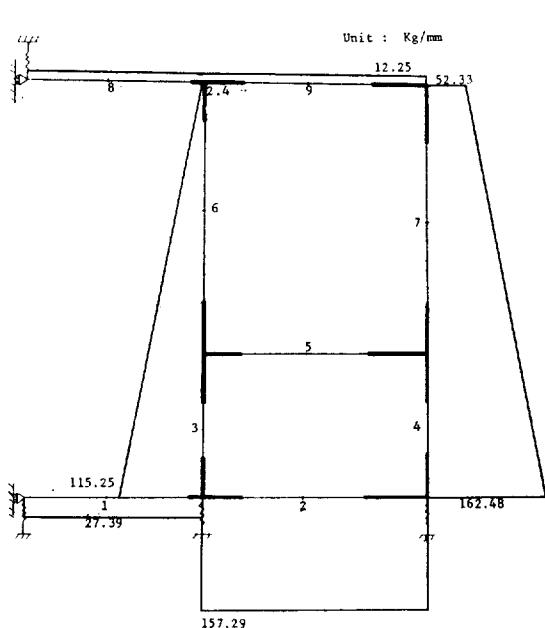


Fig. 10 Load condition (case 1)

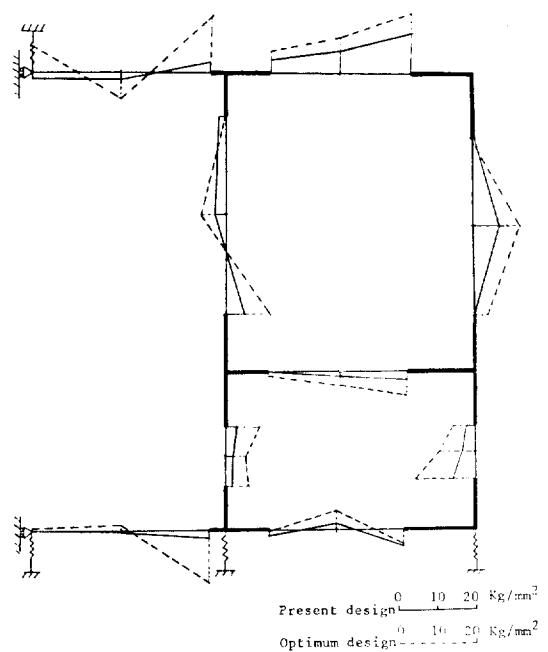
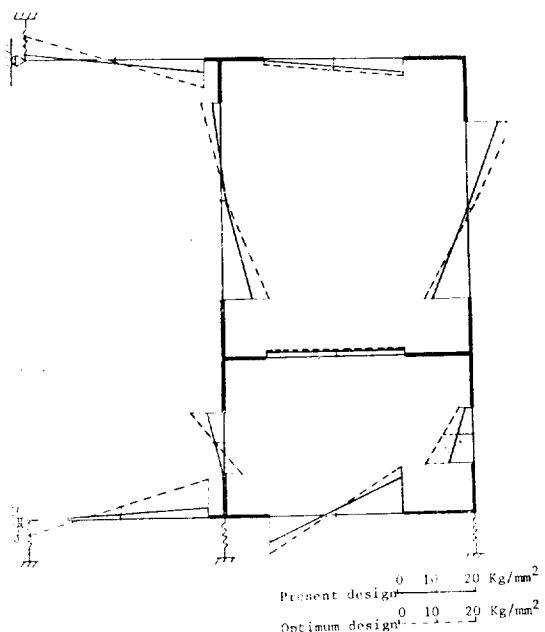
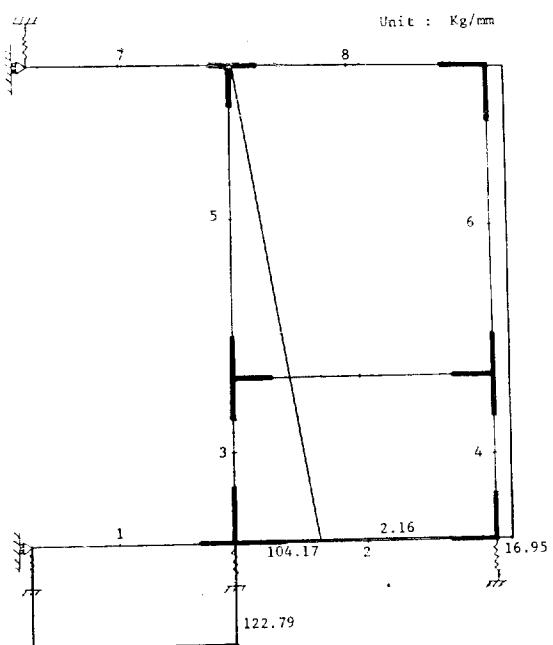
Fig. 11 Bending stress distribution of Model S-1
(case 1)Fig. 12 Shear stress distribution of Model S-1
(case 1)

Fig. 13 Load condition (case 2)

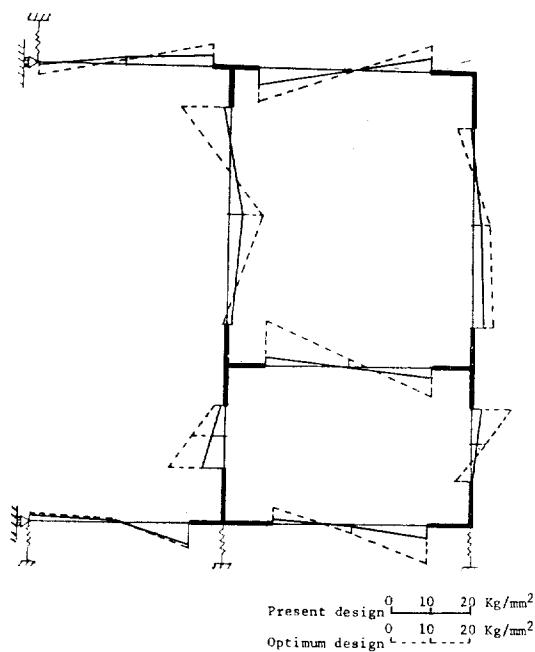


Fig. 14 Bending stress distribution of Model S-1
(case 2)

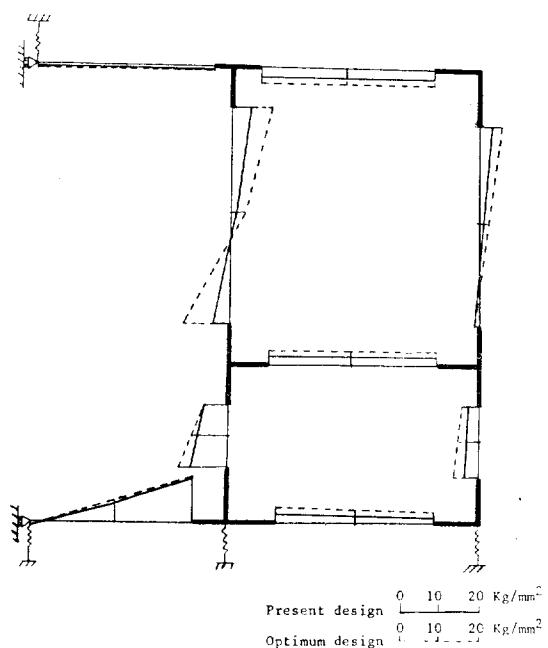


Fig. 15 Shear stress distribution of Model S-1
(case 2)

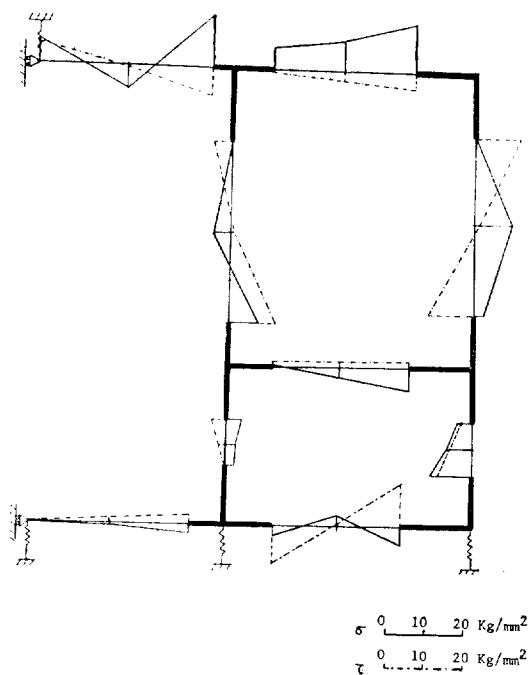


Fig. 16 Final design results of Model S-1
(case 1)

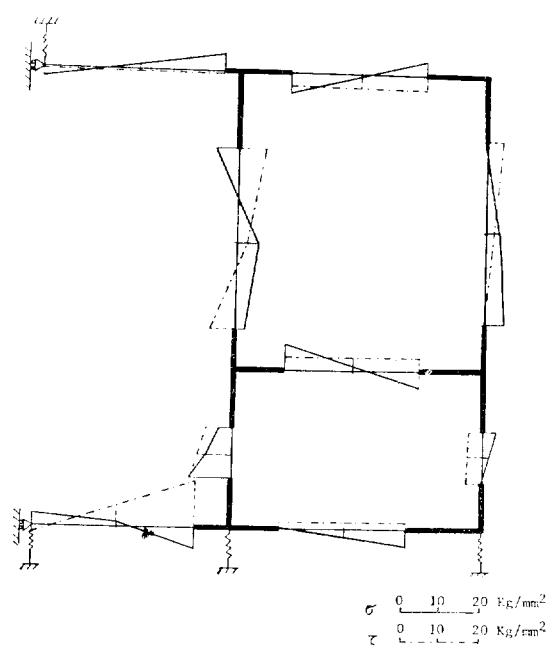


Fig. 17 Final design results of Model S-1
(case 2)

Table 5 Optimum design result of Model S-1 (case 1)

unit : cm

Element No.	1				2				3			
Input	550.	1.6	150.	3.5	450.	1.6	50.	3.2	450.	1.6	150.	3.2
Output	200.	1.0	80.	1.6	320.	1.8	80.	3.2	280.	1.0	80.	2.0
Element No.	4				5				6			
Input	500.	1.6	80.	3.2	450.	1.25	120.	3.2	350.	1.25	80.	3.2
Output	450.	1.4	40.	2.0	400.	1.0	40.	1.6	270.	1.0	40.	1.6
Element No.	7				8				9			
Input	420.	1.25	80.	3.2	200.	1.25	80.	1.6	330.	1.25	80.	1.6
Output	400.	1.0	50.	2.0	100.	1.0	40.	1.0	360.	1.0	70.	1.4
Radius	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Input	0.	180.	180.	180.	100.	100.	100.	100.	120.	120.	180.	0.
Output	5.	100.	100.	100.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	100.	5.
	$F(\text{cm}^3)$			$\frac{F_i - F_0}{F_i} \times 100$			Iteration			CPU		
Present design(F_i)	2.013×10^7											
Optimum design(F_0)	1.616×10^7			19.8			534			840 sec.		

Table 6 Optimum design result of Model S-1 (case 2)

unit : cm

Element No.	1				2				3			
Input	550.	1.6	150.	2.5	450.	1.6	50.	3.2	450.	1.6	150.	3.2
Output	450.	1.8	180.	3.6	240.	1.6	80.	1.6	360.	1.8	90.	3.6
Element No.	4				5				6			
Input	500.	1.6	80.	3.2	450.	1.25	120.	3.2	350.	1.25	80.	3.2
Output	240.	1.8	60.	1.4	270.	1.0	50.	1.5	180.	1.0	60.	2.1
Element No.	7				8				9			
Input	420.	1.25	80.	3.2	200.	1.25	80.	1.6	330.	1.25	80.	1.6
Output	270.	1.0	60.	2.7	70.	1.0	30.	1.0	300.	1.0	80.	1.6
Radius	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Input	0.	180.	180.	180.	100.	100.	100.	100.	120.	120.	180.	0.
Output	5.	360.	70.	180.	50.	50.	50.	50.	50.	60.	180.	5.
	$F(\text{cm}^3)$			$\frac{F_i - F_0}{F_i} \times 100$			Iteration			CPU		
Present design(F_i)	2.013×10^7											
Optimum design(F_0)	1.682×10^7			16.4			707			1126sec.		

spring으로 치환하여 spring지지 상태를 주었다. (Fig. 11 참조)

Fig. 11과 Fig. 14는 하중상태를 나타낸 것으로 NK

rule에서 요구하는 하중 조건 중 hogging full load condition (case 1) 및 hogging ballast load condition (case 2)을 각각 표시한 것이다.

Table 7 Optimum design result of Model S-1 (case 1+case 2)

unit : cm

Element No.	1				2				3			
Input	550.	1.6	150.	3.5	450.	1.6	50.	3.2	450.	1.6	150.	3.2
Output	450.	1.8	180.	3.6	320.	1.8	80.	3.2	360.	1.8	90.	3.6
Element No.	4				5				6			
Input	500.	1.6	80.	3.2	450.	1.25	120.	3.2	350.	1.25	80.	3.2
Output	450.	1.8	60.	2.0	400.	1.0	50.	1.6	270.	1.0	60.	2.1
Element No.	7				8				9			
Input	420.	1.25	80.	3.2	200.	1.25	80.	1.6	330.	1.25	80.	1.6
Output	400.	1.0	60.	2.7	100.	1.0	40.	1.0	360.	1.0	80.	1.6
Radius	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
Input	0.	180.	180.	180.	100.	100.	100.	100.	120.	120.	180.	0.
Output	5.	360.	100.	180.	50.	50.	50.	50.	60.	60.	180.	5.
	$F(\text{cm}^3)$			$\frac{F_i - F_0}{F_i} \times 100$			Iteration			CPU		
Present design (F_i)	2.013×10^7											
Optimum design (F_0)	1.819×10^7			9.6			1241			1966sec		

Table 3, 4는 case 1 하중을 받을 때의 실선에 발생되는 굽힘 moment 및 전단력을 나타낸 것으로 SAP 6의 결과와 본 program의 결과는 거의 일치함을 보여주고 있다.

그리고 case 1 및 case 2 경우에 대해 최적 설계를 수행한 다음 두 경우의 최적 치수중 큰 값을 최적 치수로 결정하였으며 실제의 선각중량과 비교하여 Table 5, 6, 7에 나타내었다.

Table 5는 case 1 하중을 받을 때의 최적설계의 결과로 각 부재의 최적 단면 치수 및 반경 그리고 최적 선각 중량을 나타내고 있다.

각 부재당 4개의 설계 변수를 Input하여 최적의 설계 변수를 Output하였으며 최적 선각 중량을 기준 선각 중량과 비교하여 19.8% 정도 중량감소를 얻었다. 같은 방법으로 case 2 하중 상태에서 최적설계를 한 결과를 Table 6에 나타내었으며 16.4% 정도의 중량감소를 얻었다.

실제 설계에 이용하기 위해 위의 두 경우의 최적 치수중 큰 값을 최적 치수로 결정하여 Table 7에 나타내었으며 기준 선각 중량보다 9.6% 정도의 중량감소를 기대할 수 있었다.

다음에 Fig. 12, 13, 15, 16에 최적설계에서의 응력 크기와 실적선에서의 응력크기를 비교했다. 실선은 실

적선에서의 응력 크기를 나타낸것이며 점선은 최적설계에서의 응력 크기를 나타낸 것이다. 최적 설계에서의 응력이 실적선 상태보다 크게 발생하는 것은 실적선에서의 응력이 허용 응력보다 훨씬 작게 발생하여 최적 설계 과정에서 부재의 치수를 떨어뜨리기 때문이다.

그리고 각 하중 상태에서 구한 설계 치수중 큰 치수를 실제 설계치수로 결정했을 때 case 1 및 case 2 하중을 주어 해석한 결과를 Fig. 17, 18에서 보여주고 있다. 실선은 굽힘에 의한 응력이며 점선은 전단응력으로 모든 부재에서 허용응력보다 각각 응력이 작게 발생하므로 실제 설계에 충분히 이용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 论

황강도 부재의 설계를 하는데 있어 유한 요소법을 이용하여 최적설계를 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 변단면부를 span point 개념을 이용하여 처리할 수 있다.

2. Spring 지지의 경계조건으로 3차원 해석의 효과를 얻을 수 있다.

3. 곡면부의 반경을 설계변수로 하여 span point 위치를 변화시킬 수 있으며 최적의 반경을 결정할 수 있다.

4. Full load condition (case 1)에서는 19.8 % 정도, ballast load condition (case 2)에서는 16.4 % 정도의 중량 감소를 기대할 수 있으며 실제 설계(case 1+ case 2)에 이용하면 9.6 % 정도의 중량 감소를 기대할 수 있다.

앞으로의 연구 방향은 응력이 최대로 발생하는 곡면부 45° 방향의 응력을 계산해야 하며 변단면부의 처리를 부재의 수를 늘리는 유한요소법 보다는 기울기-처짐법 등에 의해 행하여 계산시간을 줄이는데 역점을 두어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 寺澤一雄, 船體構造力學, 海文堂.

- [2] 日本鋼構造協會編, 薄板構造解析, 培風館.
- [3] 日本鋼構造協會編, 有限要素法による 構造解析プログラム, 培風館.
- [4] Hisashi Nobukawa, "On the Optimum Design of Ship Structures Taken Account of the Three-Dimensional Strength(II)", 西部造船學會 第47回講演, 昭和 48年 11月.
- [5] 강성준, "Slope-Deflection Method에 의한 횡강도 해석", 서울대학교 석사논문, 1985.
- [6] Hooke, R. and Jeeves, T.A., "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problem", *J. of the Assoc. for Computing Machinery*.