論 文

大 韓 造 船 學 會 誌
第21卷 第4號 1984年 12月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 21, No. 4, December 1984

# 船體構造의 最適設計(第1報)

## ——Bracket의 最小重量設計——

張 昌 斗*·羅 昇 洙**

# The Optimum Design of Ship Structures (1st Report)

## ——Minimum Weight Design of Brackets——

by

Chang Doo Jang*·Seung Soo Na**

**Abstract**

In this paper, the membrane and buckling analysis of beams with various shaped brackets is performed by using the finite element method.

From the viewpoint of minimum structural weight, a optimum design method to determine the optimal shapes and scantlings of brackets under design load is proposed by investigating the effects of beam depth, bracket length and aspect ratio on the structural weight.

Also optimal design data and charts for the brackets to support transverse girders or web frames of actual ships are provided.

By the present design method, it is possible to perform optimum design of brackets used in actual ships, which could result in considerable reduction of structural weight or cost, increase of dead weight and service speed of ships.

## 1. 서 언

최근 에너지 절약에 대한 요구가 높아짐에 따라 보다 효율적이고 경제적인 선박의 개발이 절실히 요망되고 있다.

따라서 선체구조 설계에 있어서도 종래 선급협회 rule이나 막연한 경험에 의존하던 설계 방식을 지양하고, 선체 구조물의 중량 및 건조비용의 극소화를 통한 자재비의 절감, DWT의 증가, speed 향상등을 위한 보다 정밀한 구조 해석과 최적 설계가 수행되어야 한다.

선체구조의 최적화에 대해서는 Lund, Moe등 (1), (2)의 연구가 있으나 주로 선급협회의 rule에 의한 간접적인 최적화의 방식을 취하고 있다. 한편 구조해석 기법과 computer의 발달에 힘입어 직접 구조물의 역학적인 거동을 계산하고, 최적화 기법을 이용한 선체구조의 최적설계에 대한 연구 (3), (4) 가 진행되어오고 있으나, 막대한 계산 시간의 소요로 실제로 복잡한 선체구조의 설계에 직접 적용하기는 극히 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선체의 deck나 bottom Plate를 지지하는 beam, girder 및 transverse frame등의 부

接受日字：1984年 9月 7日，再接受日字：1984年 11月 24日

* 正會員，서울大學校 工科大學
** 正會員，서울大學校 大學院

재 양단을 보강하는데 많이 소요 되는 bracket의 최적(최소중량) 설계를 효과적으로 수행하는 방법을 제시하고저 한다.

Bracket의 설계에 대해서는 Ueda등 (5), (6), (8)의 연구가 있으나, 이들은 보와 bracket의 소성붕괴가 동시에 일어 나는 조건으로 부터 주어진 형상의 bracket의 소요두께만을 결정하고 있다. 그러나 위의 설계 개념은 외력의 크기에는 관계없이 보와 bracket 자체의 부재활용도를 각각 최대한 고려한 설계이나, 주어진 설계하중 아래서 bracket의 최적위치, 형상 및 치수를 일반적으로 설계하고 있지는 않다. 그외 bracket에 관한 많은 연구 (7), (8)에도 불구하고 아직 체계적이고 경제적인 bracket 설계법이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 주어진 설계하중 아래서 bracket이 없는 보와 여러가지 형상의 bracket이 붙은 보의 membrane해석 및 bracket의 buckling해석을 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 즉, 보(transverse web frame)의 depth, bracket변의 길이 및 bracket의 aspect ratio 등의 변화에 따른 transverse web frame 전체의 중량을 비교 검토하여 중량 경감면에서 최적인 bracket의 형상 및 치수를 구하므로써 bracket의 최적 설계법을 제시하였다. 그리고 실제 선박의 deck나 bottom plate를 지지하는 beam, girder 및 transverse web frame 등을 지지하는 bracket의 최적 설계에 필요한 자료를 제공하고, 본 최적 설계법에 의하여 상당한 자재 절감의 효과를 기대할 수 있음을 명백히 하였다.

## 2. 기초 이론

### 2.1. 개 요

Fig. 1은 선체나 토목구조에서 흔히 접할수 있는 보에 bracket이 붙은 model로서 보의 upper flange에 design load를 가해 면내에 걸리는 stress를 구한 다음 이 stress를 initial stress로 하여 bracket만의 buckling 해석을 하여 최적 bracket의 형상을 결정 하고자 한다.

Bracket이 붙은 보의 해석은 변단면이기 때문에 이론적으로는 해석하기 곤란하고 유한 요소법에 의해 해석을 하여야 한다.

### 2.2. 유한요소 해석

우선 bracket이 붙은 보가 design load를 받을 때 면내에 걸려있는 stress 분포를 알기 위해 membrane 해석을 해야 하며 이 응력을 initial stress로 하여 bracket만의 buckling 해석을 하여야 한다. membrane 해석은 일반적인 해석방법을 사용하였기 때문에 기초이론을 생략하였으며 buckling 해석은 기초 이론 및 유한 요소법의 정식화 과정을 설명하고자 한다.

#### 2.2.1. Membrane 해석

##### 2.2.1.1. Membrane element

Web와 bracket면은 membrane element로 해석하였다.

##### 2.2.1.2. Truss element

보의 upper flange 및 lower flange와 bracket에 붙어 있는 flange는 truss element로 해석하였다.

여기서 upper flange의 유효폭은 web spacing 으로 잡았으며 lower flange는 100% 잡았다.

#### 2.2.2. Buckling해석

##### 2.2.2.1. Plate element

본 논문에서는 변위 함수 $A(x, y)$로서 Zienkiewicz의 면적 함수를 이용했다. 즉 Fig. 2에서 보인 것 같이 3각형의 면적을 $\Delta$로 해

$$L_i=\frac{A_i}{\Delta},\quad L_j=\frac{A_j}{\Delta},\quad L_k=\frac{A_k}{\Delta}$$로 정리하면

$$L_i=\frac{a_i+b_ix+c_iy}{2\Delta}$$가 된다.

여기서 $a_i=x_jy_k-x_ky_i$, $b_i=y_j-y_k$, $c_i=x_k-x_j$이다.

처짐 $W(x, y)$는 강체변위 $W^{rb}(x, y)$와 요소내변위 $W^{ss}(x, y)$의 합으로 나타나

$$W(x, y)=W^{rb}(x, y)+W^{ss}(x, y) \qquad (1)$$

가 된다.

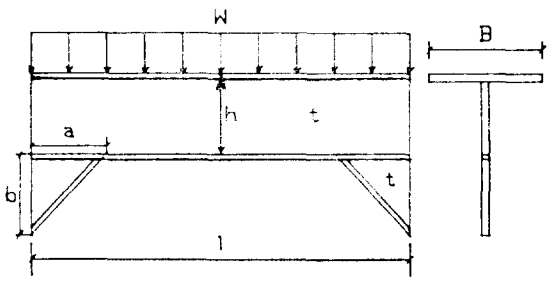


**Fig. 1** Modeling of bracketed beam

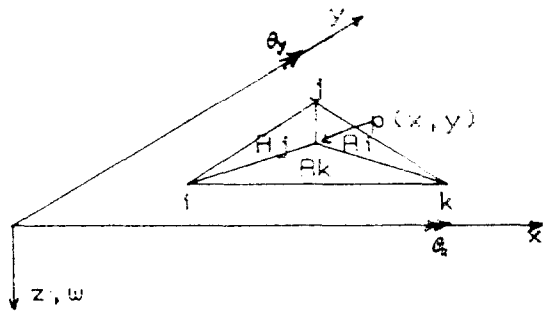


**Fig. 2** Shape of element

$i$ node에 대한 변위를 절점 변위로 나타내면

$$\{\delta\}_i=\begin{Bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix}=\sum_{i=1}^{3} N_i \begin{Bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix}_i \tag{2}$$

여기서 $N_i$는 요소의 형상 함수로서

$$N_{ix}=b_k\left(L_i^2L_j+\frac{1}{2}L_iL_jL_k\right)-b_j\left(L_i^2L_k+\frac{1}{2}L_iL_jL_k\right)$$
$$N_{iy}=c_k\left(L_i^2L_j+\frac{1}{2}L_iL_jL_k\right)-c_j\left(L_i^2L_k+\frac{1}{2}L_iL_jL_k\right) \tag{3}$$

이다.

곡률 Vector $\{\chi\}$를

$$\{\chi\}=\begin{Bmatrix} w_{xx} \\ w_{yy} \\ 2w_{xy} \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 N}{\partial x\partial y} \end{bmatrix}\{\delta\}_i=[B]\{\delta\}_i \tag{4}$$

로 두면 moment와 곡률 사이에는 다음 관계가 된다.

$$\{M\}=\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ & D_{22} & D_{23} \\ & SYM. & D_{33} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} w_{xx} \\ w_{yy} \\ 2w_{xy} \end{Bmatrix}$$
$$=[D]\{\chi\}=[D][B]\{\delta\}_i \tag{5}$$

여기서

$$D_{11}=D_{22}=\frac{Et^3}{12(1-\nu)},\quad D_{12}=\nu D_{11},$$
$$D_{33}=\frac{(1-\nu)}{2}D_{11},\quad D_{13}=D_{23}=0$$

따라서 굽힘 강성 행렬 $[K_N]$은 다음과 같게 된다.

$$[K_N]=\iint_{AN}[B]^T[D][B]\,dxdy \tag{6}$$

경사 vector $\{\theta\}$를

$$\{\theta\}=\begin{Bmatrix} w_x \\ w_y \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{bmatrix}\{\delta_N\}=[G]\{\delta_N\}$$

로 놓으면

초기 응력 행렬은 다음과 같이 된다.

$$[K_N']=\iint_{AN}t[G]^T[\sigma][G]\,dxdy \tag{7}$$

여기서 $\sigma$는 면내에 걸려있는 응력으로서 membrane 해석에서 나온 응력이다.

2.2.2.2. Stiffener element

stiffener는 beam element를 사용하였으며 굽힘 강성 행렬 $[\bar{K}_{SM}]$은 (8)과 같이 표현된다.

여기서 $EI$, $GK$는 stiffener굽힘 및 torsion 강성이고 $L$은 stiffener의 길이이다.

또한 stiffener는 평판의 양 표면에 대칭으로 붙였기 때문에 편심응력은 존재하지 않고 (9)와 같은 초기응력 행렬 $[\bar{K}_{SM'}]$가 구해진다.

여기서 $\sigma_s$는 stiffener에 걸려있는 축응력, $A$는 stiffener의 단면적, $r^2=\frac{J}{A}$이다.

2.2.2.3. Bracket의 buckling 해석

이상의 결과에서 plate element의 total potential energy $\pi_N$은

$\pi_N=\frac{1}{2}\{\delta_N\}^T[K_N+K_N']\{\delta_N\}$이 되며

stiffener element의 $\pi_M$은

$\pi_M=\frac{1}{2}\{\delta_M\}^T[K_M+K_M']\{\delta_M\}$이 된다.

Stiffener가 붙은 bracket 전체의 total potential energy $\pi$는

$$[\bar{K}_{SM}]=\begin{bmatrix} EI/L^3 & 0 & 6EI/L^2 & -12EI/L^3 & 0 & 6EI/L^2 \\ 0 & GK/L & 0 & 0 & -GK/L & 0 \\ 6EI/L^2 & 0 & 4EI/L & -6EI/L^2 & 0 & 3EI/L \\ -12EI/L^3 & 0 & -6EI/L^2 & 12EI/L^3 & 0 & -6EI/L^2 \\ 0 & -GK/L & 0 & 0 & GK/L & 0 \\ 6EI/L^2 & 0 & 2EI/L & -6EI/L^2 & 0 & 4EI/L \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$[\bar{K}_{SM'}]=\frac{\sigma_s A}{L}\begin{bmatrix} \frac{6}{5} & 0 & \frac{L}{10} & -\frac{6}{5} & 0 & \frac{L}{10} \\ 0 & \frac{6}{5}r^2 & 0 & 0 & -\frac{6}{5}r^2 & 0 \\ \frac{L}{10} & 0 & \frac{2}{15}L^2 & -\frac{L}{10} & 0 & -\frac{L^2}{30} \\ -\frac{6}{5} & 0 & -\frac{L}{10} & \frac{6}{5} & 0 & -\frac{L}{10} \\ 0 & -\frac{6}{5}r^2 & 0 & 0 & \frac{6}{5}r^2 & 0 \\ -\frac{L}{10} & 0 & -\frac{L^2}{30} & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{2}{15}L^2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$\pi=\frac{1}{2}\{\delta\}^T[K+K']\{\delta\}$이 된다.

$\pi$를 $\{\delta\}$에 관해서 변분을 취하면 다음의 고유방정식이 얻어진다.

$$\delta\pi=[K+K']\{\delta\}=0 \quad (10)$$

여기서 구한 고유치중 가장 작은 값이 좌굴 하중을 결정한다.

## 3. Bracket의 최적 설계

### 3.1. 설계 대상

2만 톤급 tanker 구조의 bottom transverse web frame을 대상으로 하여 bulkhead 사이의 부분을 center girder를 무시하고 Fig. 1과 같이 bracket이 붙은 보로 modeling하였다.

### 3.2. 목적함수($F$)

구하고자 하는 목적함수는 web와 bracket 및 bracket 자유단에 붙어 있는 flange의 weight이다. 불변양인 보의 upper flange 및 lower flange의 weight는 고려하지 않았다(Fig. 1 참조)

$$F=a\times b\times t+1\times h\times t+A\times\sqrt{a^2+b^2}\times 2 \quad (11)$$

여기서 $A$는 flange 단면적으로 0.0032 m$^2$이다.

### 3.3. 설계조건

설계조건은 아래와 같으며 실제의 bracket 설계순서를 따랐다.

(1) Design load는 DNV rule로서 둘중 큰 값을 택한다(Appendix 참조).

i) $P=10h_0+\left(K_S-\frac{1.5h_0}{T}\right)C_W$ (KN/m$^2$)

ii) $P=10(h_s-T_b)+P_d$ (KN/m$^2$) (12)

(2) Allowable stress는 18 kg/mm$^2$으로 한다.

(3) Web와 bracket의 두께는 같다.

(4) Upper flange의 유효폭은 web spacing으로 한다.

(5) 좌굴 안전율은 design load의 1.5배로 한다.

### 3.4. 설계변수

Fig. 1에 보인바와 같은 bracket 설계를 위한 설계변수는 web의 높이 ($1/h$), bracket이 보에 붙은 부분의 길이 ($1/a$), bracket의 aspect ratio ($a/b$), bracket 및 web의 두께 ($t$), 보의 단면 계수 ($z$)이다.

### 3.5. 설계방법

설계 변수를 변화시키면서 bracket 및 보의 flange에 걸리는 stress를 유한 요소법에 의해 계산하고 이 stress가 allowable stress가 되는 두께 ($t_1$)를 찾은 다음 bracket이 붙은 보의 weight를 계산한다. 또한 bracket만의 buckling을 앞서 구한 stress를 initial stress로 하여 유한 요소법에 의해 좌굴 해석하고 고유치가 좌굴 안전율($K=1.5$)이 되는 bracket만의 두께 ($t_2$)를 찾은 다음 bracket이 붙은 보의 weight를 계산한다. 모든 설계변수에 따라 두 경우의 weight를 계산한 다음 weight가 최소가 되는 bracket 형상을 $1/h$, $1/a$, $a/b$에 따라 고찰하고 bracket의 최적 형상을 결정한다.

#### 3.5.1. 해석 방법

우선 본 해석 program의 정확성을 조사하기 위해 균일분포하중을 받는 균일 I 단면 보의 중앙부 및 단부의 응력해석결과를 table 1에서 보여주고 있다. 보의 경계조건은 양단 단순지지 및 고정의 두가지이고, web는 membrane요소로, flange는 truss요소로 modelling하였다. 본 해석방법은 membrane 해석이기 때문에 Euler beam theory와 비교할 수 없고 Timoshenko beam theory와 비교한 결과 2~3%정도의 차이가 났다.

**Table 1** Test calculation

| case | stress | Timoshenko | This program | difference (%) |
|---|---|---|---|---|
| simple | $\sigma_{\text{중}}$ | 103.07 | 100.00 | 2.98 |
| | $\sigma_{end}$ | 0 | 0 | 0 |
| fix | $\sigma_{\text{중}}$ | −34.36 | −33.06 | 3.77 |
| | $\sigma_{end}$ | 68.71 | 70.41 | 2.47 |

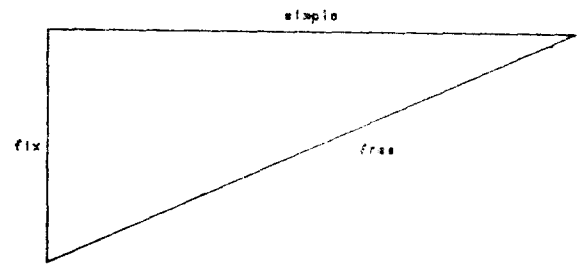


**Fig. 3** Boundary condition (out of plane)

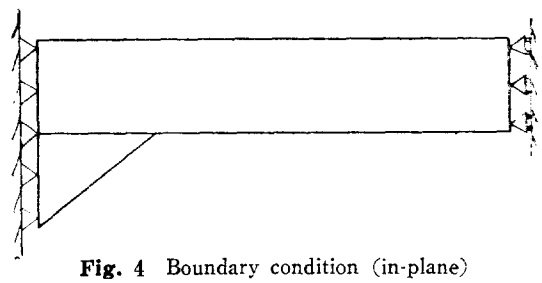

**Fig. 4** Boundary condition (in-plane)

Timoshenko beam theory와 membrane 해석의 결과가 완전히 일치하지는 않는다는 점을 고려하면 본 program은 거의 정확한 결과를 주고 있다고 생각된다.

또한 bracket의 면외 굽힘에 대한 boundary condition은 Fig. 3 에서 보인 것 같이 보와 bracket이 붙은 면은 단순지지, bulkhead와 bracket이 붙은 부분은 고정지지, bracket의 자유단은 flange로 탄성지지 되었다.

그리고 면내 변형에 대한 boundary condition은 Fig. 4에 보인것 같이 보와 bulkhead가 붙은 면은 고정지지, 보의 중간에서는 대칭조건을 이용하였다.

해석방법은 $l/h$, $l/a$, $a/b$를 변화시키면서 bending에 의한 stress가 allowable stress가 되는 두께 $t_1$과 buckling에 의한 좌굴안전율이 1.5가 되는 두께 $t_2$를 찾은 다음 weight를 산출한다. 여기서 1은 12.8 m로 잡았다.

여기서, $l/h$ : 3, 5, 10, 15

$l/a$ : 3, 4, 6, 8

$a/b$ : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0

3.5.2. Bracket 및 web의 두께 결정

Fig. 5에서 보인것 같이 두께 $t$를 구하기 위해 $t$를 1 mm에서 46 mm까지 5 mm간격으로 membrane 해석 및 buckling 해석을 하고 최대 stress가 $\sigma_a$(18 kg/mm²)와 가장 가까운 $\sigma_1$이 나오는 $t_a$를 찾고 $t_a-5$, $t_a$, $t_a+5$에서 구한 stress를 지나는 2차 포물선을 curve fitting한 다음 $\sigma_c$가 $\sigma_a$가 되는 $t_1$을 찾는다. 같은 방법으로 좌굴계수가 $K$와 가장 가까운 $\sigma_2$가 나오는 $t_k$를 찾고 $t_k-5$, $t_k$, $t_k+5$에서 구한 고유치를 지나는 2차 포물선을 curve fitting한 다음 $k_c$가 $k$(1.5)가 되는 $t_2$를 찾는다.

3.5.3. Bracket의 최적 형상 결정

Fig. 10~Fig. 17에서 보인것같이 membrane 해석에 의한 weight curve와 buckling 해석에 의한 weight curve가 만나는 점이 optimum point(*표시)가 되기 때문에 설계 변수에 따라 optimum point를 찾고 optimum point끼리 연결하여 optimum weight curve를 형성한다. 이 optimum weight curve를 이용하여 $1/h$, $1/a$, $a/b$를 바꿔가며 최적의 bracket형상을 결정한다.

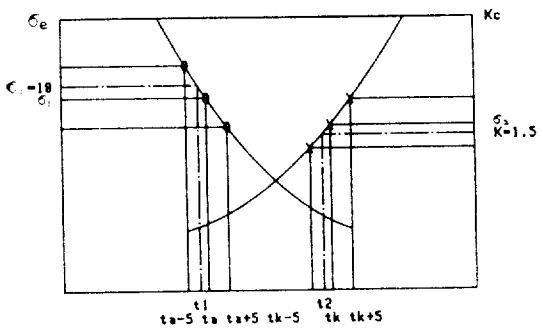


**Fig. 5** Thickness obtained by parabolic curve fitting

## 4. 계산결과 및 고찰

Fig. 1에 보인 bracket이 붙은 보의 여러가지 설계변수($l/h$, $l/b$, $a/b$)를 변화시켜 앞에서 설명한 방법으로 bracket의 최적 치수(두께)를 결정한 결과를 Table 2에 수록하였다. Table 中 上端 및 下端의 수치는 각각 membrane 및 좌굴해석에 의한 결과이다.

Fig. 6에는 bracket의 aspect ratio $a/b$가 변화하였을 때 lower flange 및 bracket의 자유단에 걸리는 stress 분포를 Fig. 6에 보였다.

Bracket 자유단 응력은 $a/b$가 커지면 최대치가 bracket과 bulkhead가 붙은 부근에서 발생하였으며 $a/b$가 작아지면서 반대쪽으로 이동 하였다. 이것은 $a/b$가 커지면 bracket을 거의 붙이지 않은 상태와 비슷하여 보 끝단에서 최대 응력이 생기며 $a/b$가 작아지면 bracket end 부분이 거의 고정된 상태가 되므로 짧아진 보의 끝단에서 최대 응력이 생기기 때문으로 생각된다.

보의 lower flange에서의 응력분포를 보면 $a/b$가 커지면 bracket의 끝단과 보가 만나는 곳에서는 응력 집중이 완화됐지만 보의 중간에서는 최대응력이 증가하고 있다.

또한 $a/b$가 작아지면 bracket의 끝단과 보가 만나는 곳에서 응력 집중 현상이 일어났지만 보의 중간에서는 응력이 감소되고 있다. 최대응력은 비교적 $a/b$가 크거나 1보다 작은 쪽에서 발생하며 $a/b$가 1.0~1.5부근에

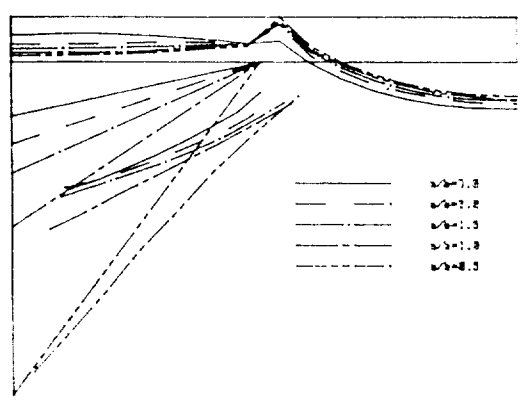

**Fig. 6** Stress distribution along the flange of a bracketed beam

**Table 2** Optimum thickness and weight according to design variables Unit : $t$(mm), $F$(m³)

| l/a | a/b / l/h | 0.5 | | 1.0 | | 1.5 | | 2.0 | | 3.0 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | t | F | t | F | t | F | t | F | t | F |
| 3 | 3 | 0.764 | 0.150 | 2.334 | 0.209 | 3.282 | 0.247 | 3.778 | 0.272 | 4.325 | 0.291 |
| | | 7.884 | 0.779 | 7.126 | 0.558 | 6.552 | 0.470 | 6.101 | 0.419 | 5.494 | 0.362 |
| | 5 | 2.051 | 0.203 | 3.770 | 0.231 | 4.741 | 0.246 | 5.585 | 0.264 | 6.709 | 0.286 |
| | | 8.843 | 0.673 | 8.012 | 0.447 | 7.388 | 0.364 | 6.852 | 0.317 | 6.188 | 0.266 |
| | 10 | 4.087 | 0.277 | 5.295 | 0.222 | 6.593 | 0.221 | 10.164 | 0.290 | 16.373 | 0.536 |
| | | 9.603 | 0.568 | 8.683 | 0.339 | 8.499 | 0.275 | 7.942 | 0.233 | 7.093 | 0.193 |
| | 15 | 5.108 | 0.303 | 6.270 | 0.221 | 9.784 | 0.258 | 13.635 | 0.304 | 23.851 | 0.434 |
| | | 10.306 | 0.549 | 9.315 | 0.318 | 8.653 | 0.232 | 8.683 | 0.283 | 7.762 | 0.161 |
| 4 | 3 | 1.644 | 0.169 | 2.785 | 0.210 | 3.536 | 0.242 | 4.066 | 0.266 | 4.559 | 0.286 |
| | | 7.389 | 0.574 | 6.397 | 0.444 | 5.896 | 0.383 | 5.510 | 0.357 | 5.016 | 0.312 |
| | 5 | 3.701 | 0.243 | 4.536 | 0.224 | 5.334 | 0.236 | 6.164 | 0.256 | 8.721 | 0.337 |
| | | 7.972 | 0.470 | 7.217 | 0.339 | 6.633 | 0.283 | 6.159 | 0.256 | 5.506 | 0.221 |
| | 10 | 6.899 | 0.300 | 8.450 | 0.254 | 10.367 | 0.265 | 13.323 | 0.309 | 20.788 | 0.433 |
| | | 8.649 | 0.366 | 8.368 | 0.252 | 7.741 | 0.204 | 7.195 | 0.178 | 6.393 | 0.148 |
| | 15 | 14.502 | 0.411 | 15.569 | 0.354 | 16.683 | 0.385 | 20.549 | 0.347 | 31.938 | 0.471 |
| | | 9.454 | 0.343 | 8.500 | 0.289 | 8.442 | 0.174 | 7.882 | 0.143 | 7.039 | 0.123 |
| 6 | 3 | 1.963 | 0.156 | 3.088 | 0.202 | 3.763 | 0.233 | 4.258 | 0.257 | 4.783 | 0.279 |
| | | 6.816 | 0.414 | 5.528 | 0.345 | 5.108 | 0.320 | 4.765 | 0.286 | 4.346 | 0.258 |
| | 5 | 4.986 | 0.239 | 5.441 | 0.222 | 6.069 | 0.233 | 6.886 | 0.256 | 9.958 | 0.356 |
| | | 6.799 | 0.314 | 6.186 | 0.249 | 5.670 | 0.219 | 5.251 | 0.199 | 4.691 | 0.175 |
| | 10 | 15.105 | 0.415 | 18.612 | 0.409 | 16.797 | 0.343 | 18.778 | 0.365 | 26.794 | 0.494 |
| | | 7.951 | 0.233 | 7.212 | 0.178 | 6.606 | 0.145 | 6.089 | 0.129 | 5.359 | 0.110 |
| | 15 | 37.935 | 0.790 | 39.824 | 0.635 | 39.524 | 0.568 | 36.732 | 0.508 | 44.104 | 0.563 |
| | | 8.675 | 0.204 | 7.889 | 0.141 | 7.252 | 0.118 | 6.690 | 0.104 | 5.882 | 0.088 |
| 8 | 3 | 1.818 | 0.132 | 3.116 | 0.193 | 3.775 | 0.225 | 4.277 | 0.251 | 4.713 | 0.272 |
| | | 5.467 | 0.349 | 5.052 | 0.303 | 4.635 | 0.273 | 4.288 | 0.251 | 3.858 | 0.225 |
| | 5 | 5.554 | 0.233 | 6.051 | 0.228 | 6.462 | 0.235 | 8.469 | 0.308 | 10.593 | 0.367 |
| | | 6.095 | 0.254 | 5.565 | 0.211 | 5.073 | 0.197 | 4.657 | 0.178 | 4.112 | 0.148 |
| | 10 | 21.189 | 0.479 | 27.498 | 0.535 | 25.297 | 0.470 | 23.197 | 0.421 | 30.868 | 0.543 |
| | | 7.108 | 0.176 | 6.437 | 0.136 | 5.845 | 0.118 | 5.332 | 0.106 | 4.625 | 0.091 |
| | 15 | 49.273 | 0.813 | 57.677 | 0.792 | 58.119 | 0.746 | 55.138 | 0.684 | 51.187 | 0.614 |
| | | 7.775 | 0.149 | 7.038 | 0.109 | 6.395 | 0.093 | 5.827 | 0.083 | 5.036 | 0.070 |

upper : membrane analysis
lower : buckling analysis

서 응력은 크게 줄어들고 있다.

다음에 Fig. 7~Fig. 9에 aspect ratio $a/b$에 따른 bracket의 면내변형과 buckling mode를 plot하였다.

같은 두께의 bracket의 좌굴 강도는 $a/b$가 커지면 강해지고 $a/b$가 작아지면 약해지고 있는데 이것은 사각평판의 $a$가 일정한 상태에서 $b$가 커지면 쉽게 좌굴되

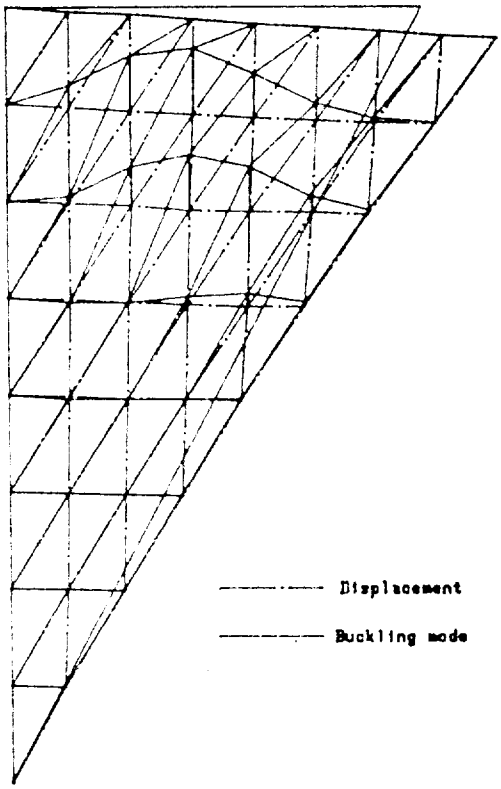


**Fig. 7** Displacement and buckling mode of bracket ($a/b=0.5$)

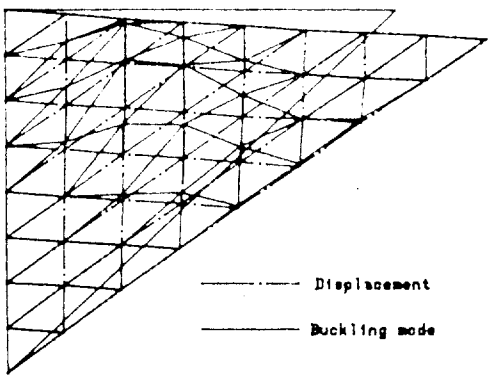


**Fig. 8** Displacement and buckling mode of bracket ($a/b=1.0$)

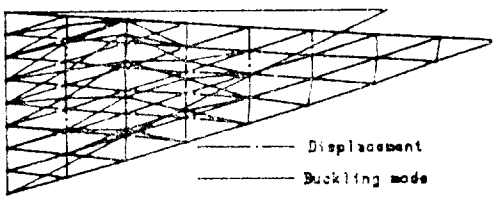


**Fig. 9** Displacement and buckling mode of bracket ($a/b=2.0$)

는 것과 일치 하는 것이다(Table 2 참조)

Fig. 10~Fig. 17에는 여러가지 depth를 갖는 보의 양단을 여러가지 형상의 bracket으로 보강하여, 보의 굽힘강도와 bracket의 좌굴강도를 각각 따로 고려하여 설계하였을 때 소요되는 부재의 중량(weight function)을 도시하였다.

실선(—)은 bracket이 붙은 보의 굽힘강도 해석에

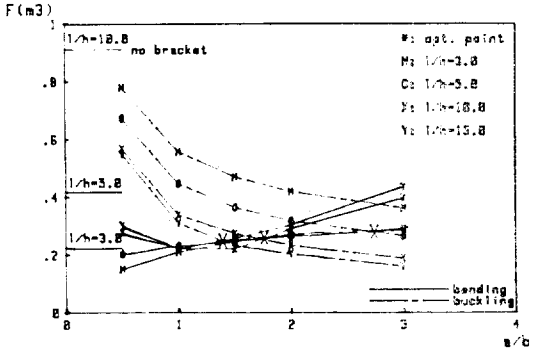


**Fig. 10** Comparison of required weights for bending and buckling strength ($l/a=3$)

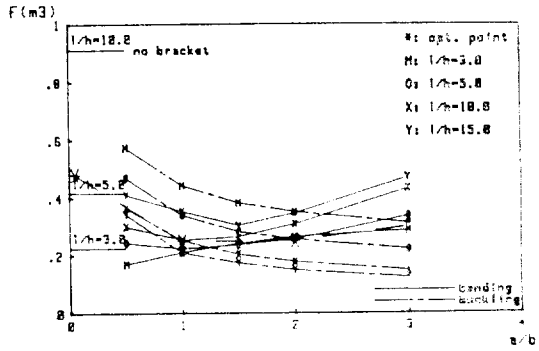


**Fig. 11** Comparison of required weights for bending and buckling strength ($l/a=4$)

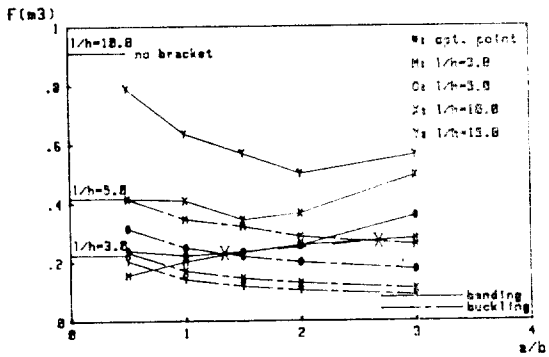


**Fig. 12** Comparison of required weights for bending and buckling strength ($l/a=6$)

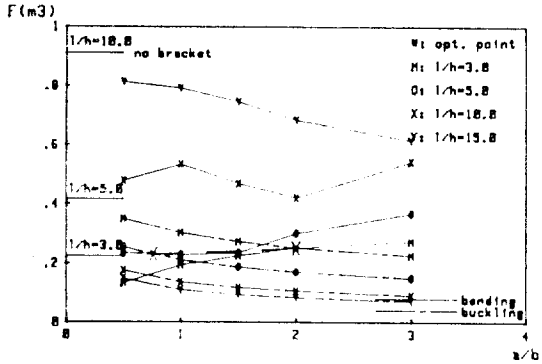


**Fig. 13** Comparison of required weights for bending and buckling strength ($l/a$=8)

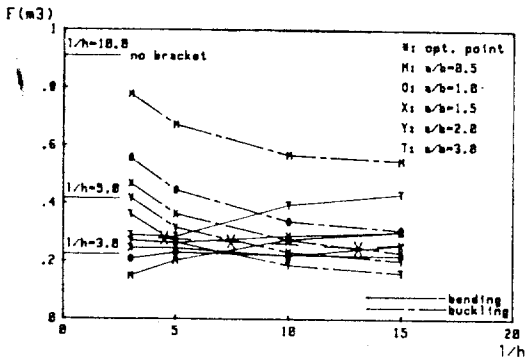


**Fig. 14** Comparison of required weights and determination of optimal design point ($l/a$=3)

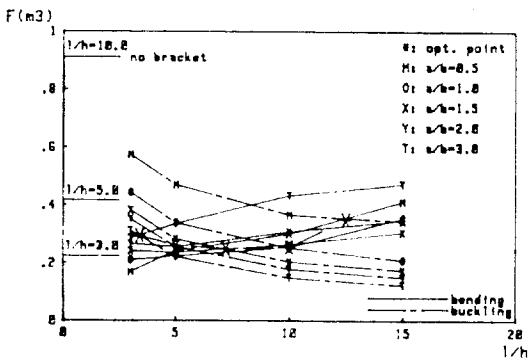


**Fig. 15** Comparison of required weights and determination of optimal design point ($l/a$=4)

의한 결과이고, 일점쇄선(—•—)은 bracket의 좌굴강도 해석에 의한 결과이다. 이들 두 곡선의 교점에서 부재 중량은 극소가 되므로 이곳이 하나의 optimal design point(*표시)가 된다.

또한 그림의 左端에는 同一한 强度를 갖고 bracket이 없는 보의 weight function도 표시되어 있다.

Fig. 18~Fig. 20은 앞의 Fig. 10~Fig. 17에서 구한

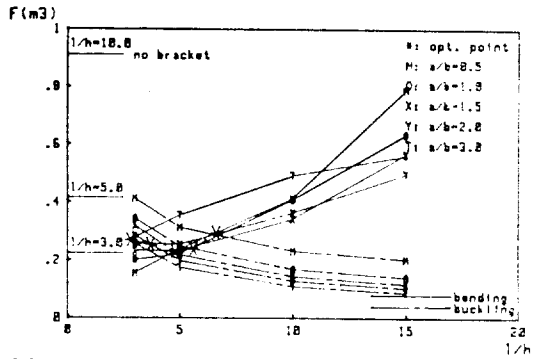


**Fig. 16** Comparison of required weights and determination of optimal design point ($l/a$=6)

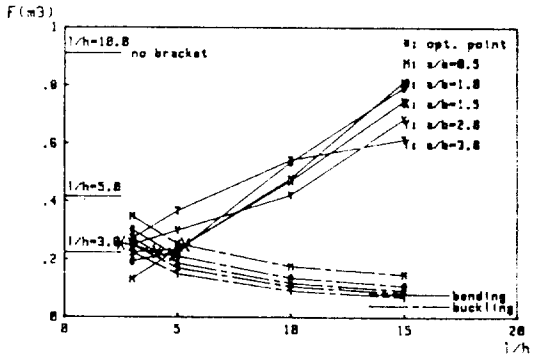


**Fig. 17** Comparison of required weights and determination of optimal design point ($l/a$=8)

optimal design point들을 연결하여 얻은 local minimum weight curve들을 종합하여 圖示한 것이다. 이들 그림에서 횡축에 표시한 보의 중앙부의 depth($l/h$)나 단면계수 ($Z$)가 설계초기에 결정되면, 가장 아래쪽의 곡선을 취하므로써 부재 중량($F$)이 最小가 되는 bracket의 변의 길이 ($l/a$) 및 形狀 ($a/b$)을 결정할 수 있다. 또한 bracket을 붙임으로써 현저한 部材重量의 輕減이 가능하며, 이러한 경향은 단면계수가 작은 보일수록 현저하다. 이 외에 bracket의 최적설계를 통하여 더욱 많은 중량의 경감이 가능함을 알 수 있다. 또 Fig. 19에서 부재중량이 최소가 되게 하는 bracket의 aspect ratio는 보의 단면계수의 증가에 따라 약간 증가하는 경향은 있으나, $a/b$가 약 1.0~1.5 부근으로 생각된다.

Fig. 21~Fig. 24에는 앞에서 설명한 방법으로 구한 bracket의 最適設計를 위한 design chart를 圖示하였다. Fig. 21과 Fig. 24로 부터 단면계수가 큰 보에는 aspect ratio ($a/b$)가 큰 bracket을 붙이고, 또 Fig. 22와 Fig. 23으로 부터는 보의 단면 계수가 적을수록 치수가 큰 bracket을 붙이는 것이 部材重量 輕減上 有利함을 알

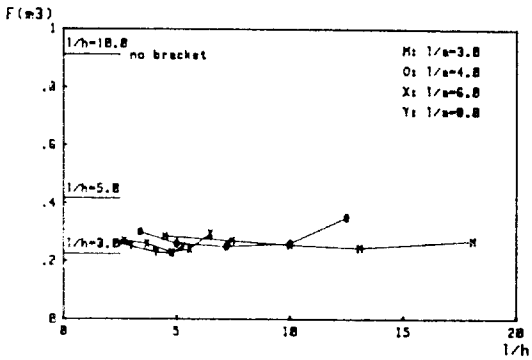


**Fig. 18** Relation between weight functions and slenderness of beams with the parameter $l/a$

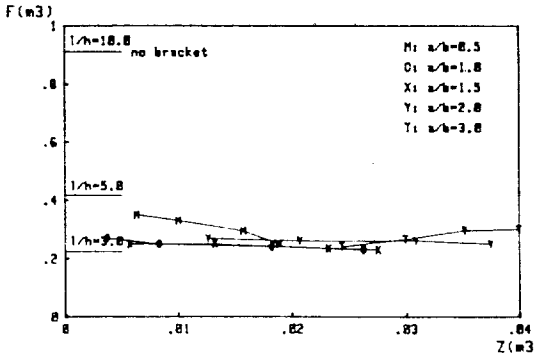


**Fig. 19** Relation between weight functions and section moduli of beams with the paramete $a/b$

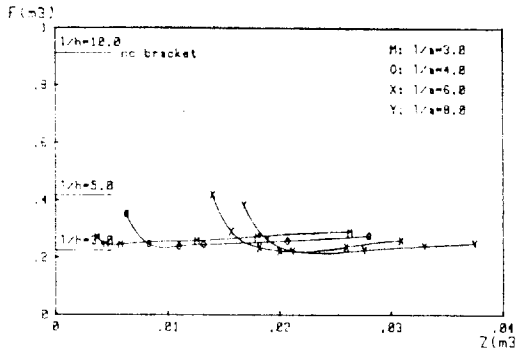


**Fig. 20** Relation between weight functions and section moduli of beams with the parameter $l/a$

수 있다.

Fig. 25 및 Fig. 26에는 web frame, girder 등 보의 단면 계수나 depth가 주어졌을 때, 부재의 最小重量을 고려하여 bracket의 最適設計를 수행한 결과 얻은 bracket의 所要두께를 각각 圖示하였다. 여기서 단면계수가 큰 deep web에는 얇은 bracket, 단면계수가 작은 web에는 두꺼운 bracket을 붙이는 것이 중량경감상 유리한 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 (13)식의 船級協會 등에서 제시하고 있는 設計基準과는 서로 相反된 결과로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Bracket thickness

$$t(\mathrm{mm}) = 0.25\sqrt{Z(\mathrm{cm}^3)} + 3.5$$

but $6.5 < t < 12.5$ $(LR)$

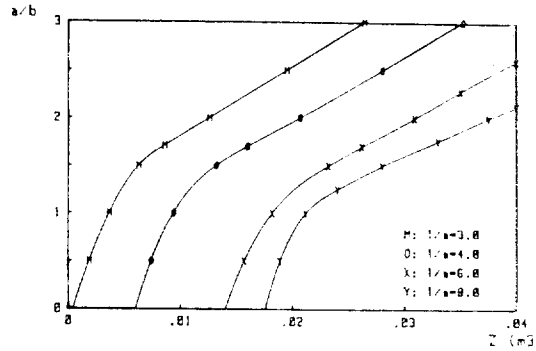


**Fig. 21** Relation between optimum aspect ratios of brackets and section moduli of beams

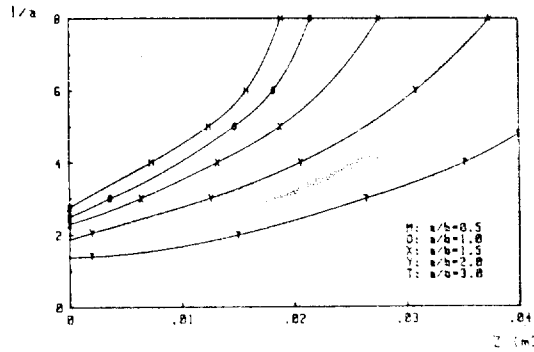


**Fig. 22** Relation between optimum length of brackets and section moduli of beams

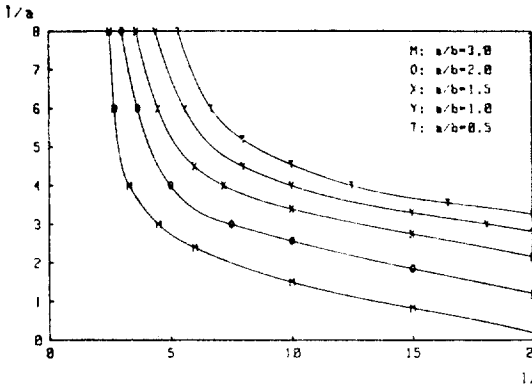


**Fig. 23** Relation between optimum lengths of brackets and length to depth ratios of beams

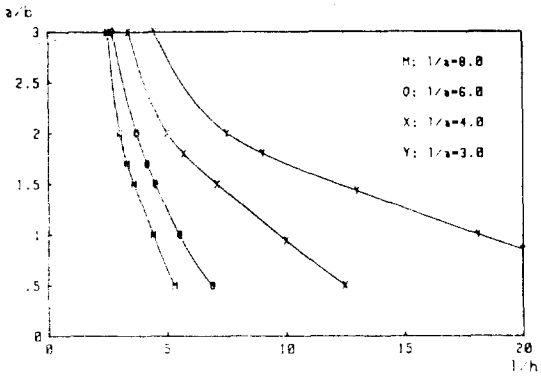


**Fig. 24** Relation between optimum aspect ratios of brackets and length to depth ratios of beams

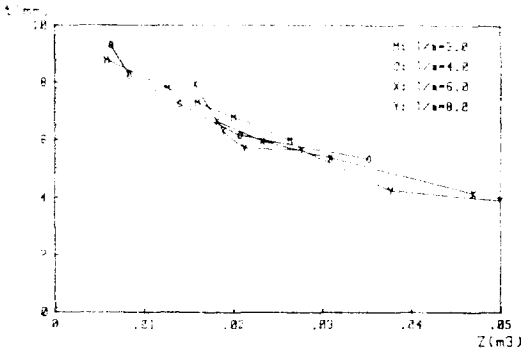


**Fig. 25** Relation between optimum thickness of brackets and section moduli of beams

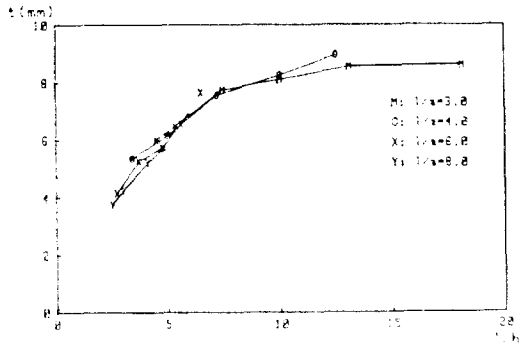


**Fig. 26** Relation between optimum thickness of brackets and length to depth ratios of beams

$$t(\mathrm{mm}) = \sqrt[3]{Z(\mathrm{cm}^3)} + 2.0 \quad \text{(Hattori)} \qquad (13)$$

그러나 이들 기준의 이론적 근거는 불명확하며, 또 선급협회에 따라 각기 상당히 다른 치수를 요구하고 있다.

日本 NK rule의 어느 정도 근거가 되고 있는 Hattori [9]의 식은 보의 소성붕괴강도와 bracket의 좌굴강도가 동일하다는 조건을 이용하여 얻은 것으로서, 設計荷重의 크기는 고려하지 않고 보와 bracket 자체의 구조적 효율만을 각각 최대한 고려한 것이다. 따라서 보의 강도가 부족할 때 보전체의 치수를 키우지 않고, bracket으로 효율적으로 補强하여 部材의 節減을 기한다는 본래의 目的에 反하여 작은 보에는 약한 bracket을, 큰 보에는 강한 bracket을 붙이도록 되어 있다.

즉 주어진 設計荷重下에서 정해진 안전률을 확보하면서 weight (cost)가 最小가 되게 경제적으로 설계한다는 개념과는 다른 것을 알 수 있다.

그리고 이들 기준은 주로 단면계수가 1,000 $cm^3$이하의 작은 보에는 적당한 값을 주지만, 단면계수가 10,000~30,000 $cm^3$인 frame, girder등 횡강도 부재에 실제로 적용하면 bracket의 두께가 25~45 mm로 극단적으로 두꺼워져 인위적인 制限을 하고 있으며, 最適形狀 ($a/b$)등에 대한 결정도 곤란하다.

따라서 보다 효율적이고 經濟的인 bracket設計를 위해서는 본 논문에서 제시한 것과 같은 直接强度解析과 最小重量의 개념을 導入한 設計를 試圖하는 것이 바람직 할 것이다.

여기서는 主로 20,000 DWT級 Tanker를 대상으로 設計가 이루어 졌으나, 보다 일반적인 design data의 제공을 위해서는 design load의 크기, 보의 span, 인접보의 剛性의 영향과 center girder 등 縱通材의 영향등을 종합적으로 고려하여 보다 정밀한 解析에 근거한 最適設計가 요청된다.

## 5. 결 언

주어진 설계하중 아래서 여러가지 형상의 bracket이 붙어 있는 보(deck beam, transverse web frame등)의 membrane해석 및 bracket buckling 해석을 수행하고 부재의 중량을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 설계하중과 보의 대략적인 치수(길이, depth)가 주어져있을 때 bracket의 최적 형상 및 치수를 일의적으로 결정하는 최적 설계법을 제안하고, 실제 설계에 필요한 data 및 design chart를 제공하였다.

(2) bracket을 붙이면 bracket이 없는 경우 보다 상당한 중량 경감이 가능하다.

(2) 보의 depth ($1/h$), bracket의 길이 ($1/a$)와 aspect ratio ($a/b$)에 따른 부재중량의 변화는 상당히 크므로 bracket의 형상 및 치수 설계에 유의 하여야 한다.

(4) depth(단면계수)가 큰 보에는 작은 치수 $(1/a)$, depth(단면계수)가 작은 보에는 큰 치수 $(1/a)$의 bracket을 붙이는 것이 중량 경감상 유리하다.

(5) 최소 중량을 주는 bracket의 aspect ratio$(a/b)$는 web의 depth에 관계없이 통상 1.0~1.5 사이에 있다.

(6) 종래 rule에서 요구하는 bracket의 설계 치수는 설계 하중의 크기에는 관계없이 보와 bracket 자체의 부재 활용도만 각각 최대한 고려한 것으로서 경제적인 설계법과는 차이가 있다.

위의 최적 설계법을 실선에 적용하기 위해서는 금후 보의 span, 인접부재의 剛性, design load의 크기 및 center girder 등 종통재의 영향을 고려한 보다 정밀한 해석이 요청된다.

끝으로 본 연구는 産學協同財團의 支援에 의한 것으로 本 硏究遂行에 協助해주신 關係諸位에게 深深한 感謝를 드린다.

## 참 고 문 헌


[1] S. Lund and J. Moe: "Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphasis on Longitudinal Strength Members of Tankers." Trans. R. Inst. Naval Arch. No. 110 (1), 1968.

[2] S. Lund: "Application of Optimization Methods Within Structural Design-Problem Formulations", Computer & Structures, Vol. 4, 1974.

[3] O.F. Hughes and F. Mistree: "An Automated Ship Structural Optimization Method", Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design Ⅱ, North-Holland Publishing Company, 1976.

[4] E. Pettersen: "Three-Dimensional Structural Analysis of Tankers and Optimization of Plane Transverse Frames", Det Norske Veritas, Report No. 72-15-S.

[5] Y. Ueda and T. Yao: "A Method to Determine the Necessary Thickness of a Corner Bracket", J. Soc. Naval Arch. Japan No. 152, 1982.

[6] Y. Ueda and T. Yao: "A Method to Determine the Necessary Thickness of a Corner Bracket (2nd Report)", J. Soc. Naval Arch. Japan, No. 154, 1983.

[7] C.G. Salmon: "Analysis of Triangular Bracket-Type Plates", A.S.C.E. EM 6, Dec. 1962.

[8] Y. Ueda and M. Matuishi: "Elastic-Plastic Analysis of Steel Structures Using the Finite Element Method(3rd Report)—Buckling of Triangular Plate under Various Loading Conditions—", J. Kansai Soc. Naval Arch. Japan, No. 131, 1969.

[9] K. Hattori: "Stability Criteria in Ship Structural Design (Part 2)", 住友重機械技報, Vol. 25, No. 73, March 1977.


## APPENDIX Design Load에 관한 규정

DNV rule에서 규정하는 bottom에서의 design load (pressure)는 다음 둘중 큰 값이다.

(1) $P=10h_0+\left(K_S-\frac{1.5h_0}{T}\right)C_W$ (KN/m²)

$h_0$=Vertical distance in $m$ from the waterline at draught $T$ to the load point

$k_s$ : 6 aft of A.P.
: 3 between $0.2L$ and $0.7L$ from A.P.
: $8/C_B$ forward of F.P.

$C_W$ : $0.0792L$ $L\leqq 100$
: $10.75-((300-L)/100)^{1.5}$ $100<L<300$
: $10.75$ $300\leq L\leq 350$
: $10.75-((L-350)/150)^{1.5}$ $L>350$

(2) $P=10(h_s-T_b)+P_d$ (KN/m²)

$h_s$ : Vertical distance in $m$ from the point to the top of tank

$T_b$ : design ballast draught in $m$ amidships, normally taken as $0.35T$ for dry cargo vessels and $2+0.02L$ for tankers.

$P_d$ : net dynamic additional pressure, normally 25 KN/m².