

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 31 卷第 4 號 1994年 11月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 31, No. 4, November 1994

## 선박 선저외판의 좌굴특성에 관한 연구 - 보강재의 구속영향 검토 -

함주혁\*, 김을년\*\*

## Buckling Characteristics of Ship Bottom Plate - On the Stiffener Restraint Effects -

by

Juh H. H\* and Ul N. Kim \*\*

### 요 약

선저외판은 수압과 동시에 면내 압축력을 받는다. 특히 살물선이 Alternate은 하중상태에서 홀수가 큰 경우, 외판구조는 배길이 및 폭방향의 극심한 압축력과 횡수압을 받기 때문에 설계자가 기존의 선급규정 및 설계기준을 이용하여 선저외판의 치수를 결정하고자 할 때 상당한 어려움을 겪는다.

본 연구에서는 선저 부위의 격자 (Grillage)구조물에서 관주의를 둘러싼 보강재의 비틀림 강성을 추가로 고려하여 선저외판의 경계부가 탄성구속이며 면내 및 면외의 복합하중이 작용하는 선저외판의 좌굴강도 평가를 통해 보다 실제적인 선저외판의 치수 결정에 대한 선박 구조설계 측면에서의 타당성을 실적선 자료를 근거로하여 검토해 보고자 한다.

따라서 경계조건에 따른 판의 탄성좌굴강도의 영향을 특성치 문제로 취급하여 유도된 판의 탄성구속 좌굴계수를 기존의 평가식에 추가로 고려하는 좌굴평가 방법에 근거하여 실적선의 선저외판 치수를 계산하였다.

또한 극심한 면내 및 면외하중과 주변 보강재 효과를 고려하여 상기 계산에 따라 산출된 외판치수에 대한 평가와 다양한 선급 규정에 따른 결과 그리고 1차연구의 방법에 따른 결과를 서로 비교 분석하여 보았으며 이들 각종 평가 결과들을 토대로 실적선 선저외판의 좌굴평가에 대한 실용성을 타진해 보았다.

### Abstract

Bottom plates of empty hold are subjected to not only water pressure but also bi-axial inplane loads, specially in the alternate full loading condition of bulk carrier.

This kind of plate behaviours is very difficult to be explained and to be estimated us-

---

발 표 : 1994년도 대한조선학회 춘계연구발표회('94.4.22)

접수일자 : 1994년 5월 9일, 재접수일자: 1994년 8월 24일

\* 정희원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

\*\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

ing common buckling design guide in the initial design stage of hull structure, therefore, some more concrete studies for this plate structure was performed based on the currently developed buckling estimation formula.

In this buckling formula, torsional stiffness effects of edge stiffener are included additionally and effects of elastic buckling strength of plate panel are treated as characteristic value problem.

Also considering boundary stiffener effects and inplane and lateral loading, evaluation of bottom plate scantling using this formula, calculated results using various classification regulation of buckling strength and results of first report approach are compared each other and useful guides using developed formula for bottom plate scantling design are discussed.

1. 서론

실제 선박구조설계에서 다양한 판좌굴 설계 공식이 제시되어 사용되고 있다. 특히 각 선급협회는 그들 자신의 설계지침을 제시하고 있으나 하중조건과 경계조건 등에 많은 제약이 있다.

또한 대부분의 실제 판좌굴 공식은 단부가 단순지지이거나 고정이라는 가정하에 유도되고 있으며 특히 이는 각각 판단부에서 0이나 무한대( $\infty$ )의 회전강성에 대응하므로 실제판들은 주변보강재의 비틀림강성 때문에 단순지지와 고정사이의 어떤 값을 가지는 경우가 일반적이라 볼 수 있다[1].

한편 최근의 판구조부재의 좌굴강도에 관련된 당사의 연구활동 실적을 살펴보면 선박판에 대한 새롭고 정도 높은 좌굴 설계공식이 1차로 기본적인 면내하중 성분과 더불어 용접잔류응력과 횡하중을 고려하여 대표적인 4가지 단부지지조건에 대해 개발되었으며[2], 2차로 새로운 소성수정식을 고려하여 탄소성 좌굴강도를 보다 잘 평가 할 수 있게 제시되었고[3], 3차로 앞선 설계공식에 실제 주변보강재의 비틀림강성 영향을 고려하여 개선된 바 있다[4].

이 3차연구[4]에서 단부가 탄성구속의 직사각판에 대한 탄성 좌굴조건이 특성치 문제로 유도되었으며 좌굴 시리즈 해석이 가로-세로비와 단부지지 부재의 비틀림 강성 관점에서의 변화를 통해 수행되었다. 여기서 얻은 결과를 기초로 판부재의 좌굴평가식의 평가기능이 추가되었다.

이들 각 단계별로 개발된 좌굴평가식에 대해 기존의 이론해, 각국선급 설계식에 의한 결과 또는 수치해석적 결과와 비교하여 단위판 부재에 대한 좌굴강도의 해석정도와 유용성을 확인한 바 있다[5].

또한 실제 선박구조설계관점에서 난제의 하나인 살

물운반선의 선저외판치수 결정문제를 2차연구[3] 종료 단계에서 개발된 평가식과 실적선자료를 근거로 하여 선저외판의 종 및 횡방향의 좌굴고유 파형과 횡수압에 따른 파형의 상관효과를 고려한 외판부재 거동의 고찰과 선측방향의 판부재 경계조건을 이상화시켜 단순과 고정의 경계조건 조합에 의해 보다 합리적인 최적판 두께를 제공 받을 수 있는 가능성을 1차로 타진하여 보았다[6].

따라서 본 연구에서는 앞 논문[6]에 대한 2차 단계의 연구로서 주변보강재의 회전강성을 고려하여 선저외판의 최적판두께를 살펴보고 그 평가결과를 분석해 본다.

이를 위한 하중조건의 한 예로 실제 선박판부재의 선저외판은 수압과 동시에 면내 압축력을 받고 특히 Fig. 1과 같은 살물선의 경우 Alternate 만재하중상태에서 큰 파가 올 경우 이 외판구조는 배길이 및 폭방향의 극심한 압축력과 횡수압을 받아 기존의 선급 및 설계기준을 이용한 설계치수 결정에 어려움을 겪는다.

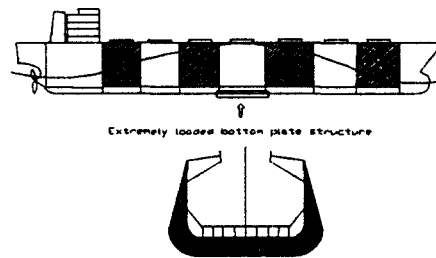


Fig. 1 Extremely loaded condition of bulk carrier

본 연구에서는 보다 구체적인 방법으로 실제 판주위를 둘러싼 보강재의 비틀림 강성을 추가로 고려하여 선저외판의 경계부가 탄성구속이며 면내 및 면외의 복합하중이 작용하는 선저외판의 좌굴강도 평가를 통해

보다 실제적인 선저외판의 치수 결정에 대한 선박구조 설계측면에서의 타당성을 실적선 자료를 근거로 하여 검토해 보고자 한다.

### 2. 산적화물선 선저외판의 판 및 보강재 구조 특성

본 연구의 목적은 판부재의 주변보강재의 회전구속을 좌굴평가에 추가로 고려하여 선박 판부재 특히 극심한 하중상태에서의 선저외판 두께를 검토하고 이의 효율성을 타진함에 있다. 따라서 우선 건조된 살물운반선의 선저외판에 대한 기본적인 특성을 굽힘 및 비틀림 강성을 중심으로 조사하였다.

1차 연구[2]에서 국내 약 20년간에 걸쳐 건조된 실적선을 근거로 선저외판의 판부재 특성을 살펴본 바 있으며 이에 따르면 판의 폭-두께비 ( $\beta = b/t\sqrt{\sigma_0/E}$ )가 2.0 부근의 값을 보이며 분포영역이 1.5 ~ 2.5 정도에 달했고 가로-세로비 ( $\alpha = a/b$ )는 3을 중심으로 2 ~ 5의 사이에 분포함을 알 수 있었다[6].

본 연구에서는 산적화물선의 선저외판 보강재의 강성비특성이 추가로 조사되었으며, Fig. 2에는 주변 보강재 중 장변에 따른 종방향 보강재의 정규화된 굽힘강성비를 나타내었고 Fig. 3에는 같은 선저외판 종방향 주변보강재에 대한 회전강성비를 나타내었다. 여기서  $EI_L/bD$  와  $GJ_L/bD$  는 장변지지부재의 정규화된 굽힘강성비 및 회전강성비로  $I_L$ 과  $J_L$ 은 각각 장변보강재의 관성모우먼트와 비틀림 강성이다.

일반선박에 대한 지지부재들의 강성비가 선종별로 조사되어 있는 참고문헌[4]와 비교·분석하였다.

그 결과, 본 연구에서 조사한 산적화물선의 선저외판의 굽힘강성비(Fig. 2의 하) 및 회전 강성비(Fig. 3의 하)는 일반선박의 전체 지지보강재[4](Fig.2와 3의 상)의 분포와 비교시, 대체적으로 하단부에 있어 평균 이하의 값을 가지고 있으나, 산적화물선의 선저외판보강재라는 고유의 부재기능을 하고 있으므로 큰 분산을 보이지 않고 평균치에 밀집되어 있으나 이들 강성비특성은 선박 길이의 영향과는 무관한 분포를 보이고 있다.

### 3 보강재의 회전강성을 고려한 판의 좌굴 연구

판부재에 부착된 주변보강재의 회전강성을 고려한 판의 거동 연구에 관련된 두가지 접근법을 살펴보면 다음과 같다[5][7].

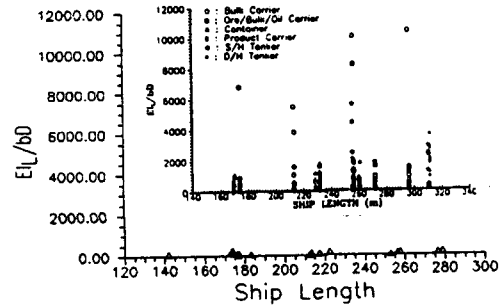


Fig.2 Normalized bending rigidity of bottom longitudinal stiffener for bulk carrier

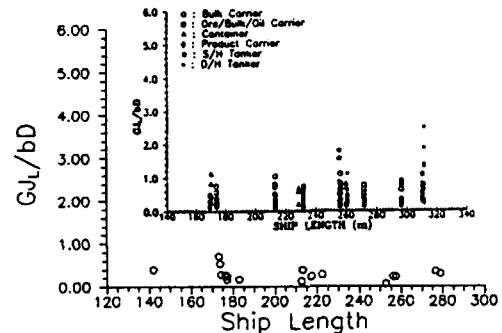


Fig.3 Normalized torsional rigidity of bottom longitudinal stiffener for bulk carrier

#### 3.1 최소 포텐셜에너지 원리에 의한 해석

4번지지된 직사각형판의 긴변에 따라 비틀림 강성을 가진 경우의 거동은 판 대치집이론에 의한 적합조건식과 평형방정식에서 출발하여, 판의 처짐을 가정하고 가상에너지법에 의해 미정계수를 결정하고 판의 거동을 파악한다.

즉, 판치짐  $W$ 를 판의 면의변형에 대한 주변조건 및 좌굴변형을 고려하여 (3.1)식과 같이 가정하고

$$W = \sum_{n=1}^N W_n \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{b} y \quad (3.1)$$

여기서  $W_n$  = 미정계수

식(3.1) 중 처짐항수  $n$ 는 가로-세로비 ( $\alpha = a/b$ )에 따라 근사적으로 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} n &= 3 \text{ for } \alpha = 3 \\ n &= 4 \text{ for } \alpha = 4 \end{aligned}$$

(3.1)식에 대한 기본적인 주변조건외에 보강재 주변에서의 역학적 경계조건은 근사적으로 다음의 형이

이용된다.

$$\pm GJ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)_{y=0,b} = D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)_{y=0,b} \quad (3.2)$$

앞서 가정된 처짐식을 적합조건식에 대입하여, 면내 변형에 대한 하중조건 및 주변조건들을 만족하는 응력 함수 F를 구한다. 이후 응력함수 F와 처짐식을 전포텐셜 에너지식에 대입하여 시스템전체의 포텐셜에너지가 극치를 가지는 조건 즉,

$$\frac{\partial \phi}{\partial W_n} = 0 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (3.3)$$

으로부터 미정계수를 결정한다. 단, 이 때의 계전체의 위치에너지  $\phi$ 는

$$\phi = U_b + U_m + U_t \quad (3.4)$$

로 판의 굽힘변형에너지  $U_b$ 와 면내변형에너지  $U_m$  외에 판주변에 따른 보강재의 비틀림에 의한 변형에너지  $U_t$ 를 추가한 것이다.

이의 구체적인 표시를 4변지이지고, 가로-세로비의 직사각형판에 대해 다음식이 성립된다.

$$\begin{aligned} & \frac{12(1-\nu^2)}{\alpha^2} \left[ 2n^2 \bar{B}_0 \left( \frac{W_n}{t} \right) + \sum_{n-r=1} \left\{ -\frac{r^2}{2} \bar{A}_r + \left( n - \frac{r}{2} \right)^2 \bar{B}_r \right\} \right. \\ & \left. \left( \frac{W_n - r}{t} \right) - \sum_{n \geq r - n \geq 1} \left\{ -\frac{r^2}{2} \bar{A}_r + \left( n - \frac{r}{2} \right)^2 \bar{B}_r \right\} \left( \frac{W_{r-n}}{t} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{n \geq r+n} \left\{ -\frac{r^2}{2} \bar{A}_r + \left( n + \frac{r}{2} \right)^2 \bar{B}_r \right\} \left( \frac{W_{r+n}}{t} \right) \right] \\ & + \left\{ \left( 1 + \frac{n^2}{\alpha^2} \right) - \{ P / P_{co} - 6(1-\nu)J \} \left( \frac{n}{k} + \frac{k_n}{\alpha^2} \right)^2 \right\} \frac{W_n}{t} \\ & = \frac{192(1-\nu^2)}{\pi^6} \cdot \frac{1 - \cos n\pi}{2n} \cdot \frac{qb^4}{Et^4} \quad (3.5) \end{aligned}$$

여기서,  $\bar{A}_0 = 0$ ,

$$\begin{aligned} \bar{B}_0 &= \frac{1}{32\alpha^2} \sum_{n=1}^N n^2 \left( \frac{W_n}{t} \right)^2 \\ \bar{A}_n &= \frac{\alpha^2}{4n^4} \left[ \sum_{|k-l|=n} \sum (kl - k^2) \frac{W_k W_l}{t^2} \right. \\ & \quad \left. + \sum_{k+l=n} \sum (kl + k^2) \frac{W_k W_l}{t^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_n &= \frac{\alpha^2}{4(n^2 + 4\alpha^2)^2} \left[ \sum_{|k-l|=n} \sum (kl - k^2) \frac{W_k W_l}{t^2} \right. \\ & \quad \left. + \sum_{k+l=n} \sum (kl - k^2) \frac{W_k W_l}{t^2} \right] \end{aligned}$$

- $P_{co} = \pi^2 D \{ \alpha / K + K / \alpha \}^2 /$   
 : 수압이 없을 때의 좌굴하중  
 $k$  : 양의 정수(좌굴 반파수)  
 $\alpha = a/b$   
 : 판의 길이-폭 비

이들 식으로부터 지지단부에 회전강성을 가진 판부재에 대한 작용하중과 처짐간의 관계가 도출될 수 있다.

이의 한 예로써 판길이-폭 비가 2인 경우에 대하여 처짐과 압축하중관계를 Fig.4에 표시하였다. 이는 판부재( $\alpha=2$ )에 대하여 횡하중의 크기( $Q = qb^4/Et^4$ )가 3.0인 경우에 대하여 비틀림 강성( $J$ )을 변화시키면서 좌굴강도를 각각 찾아보았다.

### 3.2 특성치 문제로서의 판좌굴 문제

본 연구에서, 판의 긴변을 X방향으로 취하게 하여 판의 가로-세로비는 항상 1이거나 이보다 크다. 면내 복합하중을 받은 평판의 처짐 W에 대한 기초 미분방정식은 처짐 W가 판두께 t에 비해 작다는 가정하에서 도출되었다[8].

$$D(W_{,xxxx} + 2W_{,xxyy} + W_{,yyyy}) + t(\alpha_x W_{,xx} + \alpha_y W_{,yy} + 2\tau_{xy} W_{,xy}) = 0 \quad (3.6)$$

- 여기서,  $\alpha_x \alpha_y = x, y$  방향의 축응력  
 $\tau_{xy}$  = 전단응력  
 $D = Et^3/12(1-\nu^2)$   
 $E$  = 탄성계수  
 $\nu$  = 포아슨 비

식(3.6)의 해 W는 작용하중하의 판의 처짐형상을 나타내며, 이는 평형상태 혹은 불안정상태이다.

좌굴강도는 한 bifurcation point(분기점)에서의 하중으로 정의되는데 여기서 면내 평형상태  $W=0$  조건 이외에 평형을 유지하나 불안정한 어떤 처진 형태가 발생한다.

식(3.6)를 풀기 위해 판의 지지조건으로부터 얻어지는 단부조건이 주어져야 하며, 다음의 단부조건이

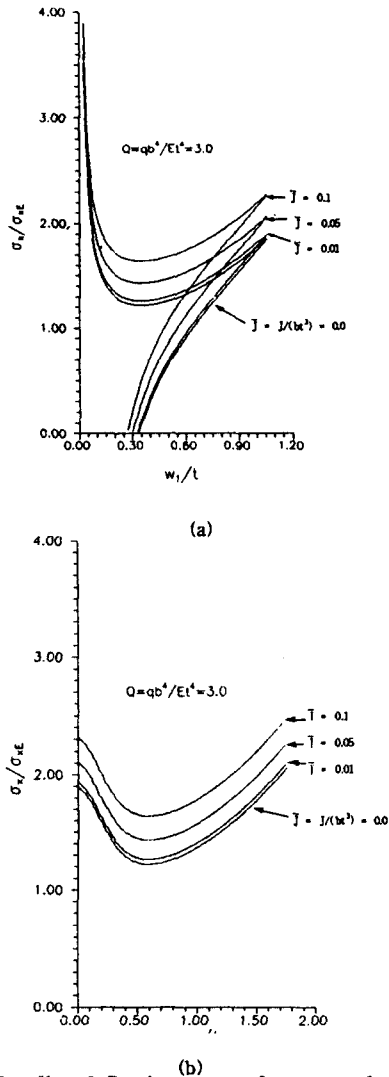


Fig.4 Loading-deflection curves for rectangular plate with simply supported edges

고려되었다.

$$w = 0 : \text{모든 단부} \quad (3.7.a)$$

$$\mu_x = m_x : \text{짧은 단부} \quad (3.7.b)$$

$$\mu_y = m_y : \text{짧은 단부} \quad (3.7.c)$$

여기서,  $\mu_x, \mu_y$  : 짧고, 긴단부 각각에서의 판부의 굽힘 모우먼트

$m_x, m_y$  : 짧고, 긴단부 각각에서의 지지부의 비틀림 모우먼트

판부의 굽힘모우먼트는 다음과 같이 주어진다[9].

$$\mu_x = -D(W_{,xx} + \nu W_{,yy}) \quad (3.8.a)$$

$$\mu_y = -D(W_{,yy} + \nu W_{,xx}) \quad (3.8.b)$$

여기서, 단부가 직선을 유지한다는 가정하에 짧은 단부의  $W_{,yy}$ 와 장단부의  $W_{,xx}$ 는 0이 되어야 한다.

지지부재의 비틀림모우먼트는 역시 다음과 같이 표시된다[9].

$$m_x = E\Gamma_S W_{,yyyx} - GJ_S W_{,yyx} \quad (3.9.a)$$

$$m_y = E\Gamma_L W_{,xxxxy} - GJ_L W_{,xxy} \quad (3.9.b)$$

여기서,  $J_S, J_L$  = 단, 장 단부 각각에서의 지지부재의 비틀림 상수

$$= 1/3(b_w t_w^3 + b_f t_f^3) : (\text{한판에 대해})$$

$$= 1/6(b_w t_w^3 + b_f t_f^3) : (\text{연속보강판에 대해})$$

$b_w, t_w$  = 지지부재 웨브의 폭 및 판두께

$b_f, t_f$  = 지지부재 프랜지의 폭 및 판두께

$\Gamma_S, \Gamma_L$  = 장, 단 단부에서의 지지부재의 flexural- 비틀림 상수

연속 보강판을 고려할 때 지지부재는 판단부에 따라 두 근접판의 회전변형에 저항한다. 이러한 관점에서  $J_S$ 와  $J_L$ 은 원래 부재에 대한 반값을 취해야 한다.

역시  $\Gamma_S$ 와  $\Gamma_L$ 의 값은 항상 매우 작으며 실제 적용에 있어서  $\Gamma_S = \Gamma_L = 0$ 이 사용되어 진다[9].

단, 장변에 공히 탄성구속이 되는 판에 대해 바로 식 (3.6)을 풀기란 매우 어렵다. 따라서 다음에 한 단부가 단순지지이고 다른 단부가 탄성구속인 직사각형 판을 각각 먼저 고려한다. 그리고 이때 이들 결과는 양쪽 단부 탄성구속의 조건을 고려하여 결합시킬 수 있다.

이 미분방정식(3.6)의 일반해는 다음과 같이 표시된다.

$$W = C_1 W_1(\alpha_1, x, y) + C_2 W_2(\alpha_1, x, y) + C_3 W_3(\alpha_2, x, y) + C_4 W_4(\alpha_2, x, y) \quad (3.10)$$

여기서,  $C_1 \sim C_4$  = 결정되어질 상수(참고문헌[3]참조)

$\alpha_1 \sim \alpha_2$  = 좌굴강도계수 (참고문헌[3]참조)

해(3.10)를 경계조건(3.7)에 대입하면 선형 동차식의 한군을 낳는다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.11)$$

여기서,  $\lambda =$  파라메타  $\alpha$ 의 초월함수  
 $\lambda$ 의 임의 값에 대해 식(3.11)은 행렬식  $\Delta$ 이 0이 되면 0이 아닌 해를 가진다. 즉

$$\Delta = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda_{44} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.12)$$

조건(3.12)을 전개하면  $\alpha$ 에 대한 식을 주며 이 식을 풀면 좌굴강도가 얻어진다.

#### 4. 복합하중하의 새로운 판의 좌굴설계 공식

경계조건에 따른 판의 탄성좌굴강도의 영향을 특성치문제로 취급하여 유도된 판의 탄성구속 좌굴계수를 기존의 평가식에 추가로 고려하는 좌굴평가방법에 근거하여 판좌굴 공식이 개선되었다.

따라서 단부에서의 지지구조의 회전 구속영향을 고려한 복합하중에서의 판좌굴 설계공식의 최종표현은 다음과 같이 된다. 여기서 조합하중간의 좌굴상관관계는 참고문헌[2][3]에 언급한 것과 같다고 가정한다.

$$\Gamma_B = \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{\sigma_{xcr} \cdot R_{sx}} \right]^{\alpha_1} + \left[ \frac{\sigma_y + \sigma_{rey}}{\sigma_{ycr} \cdot R_{sy}} \right]^{\alpha_2} - \eta_a \leq 0 \quad (4.1)$$

여기서,  $\eta_a$  : 좌굴에 관한 안전계수(1.0으로 잡는다)

$\sigma_x, \sigma_x$  : x,y방향으로 작용하는 압축응력  
 (인장응력 작용시는 0으로 취급)

$\sigma_{xcr}, \sigma_{ycr}$  : x,y방향으로 축압축에 대한 임계 좌굴 응력으로 이는 소성 수정인자에 의해 수정됨

$R_{sx} = 1.0 \quad (\tau/\tau_{\alpha})^{\alpha_3}$

$R_{sy} = 1.0 \quad (\tau/\tau_{\alpha})^{\alpha_4}$

$\tau$  : 작용 단부 전단응력

$\tau_{\alpha}$  : 소성수정에 의해 수정되는 단부 전단에 대한 임계 좌굴응력

$\alpha_1 - \alpha_4$  : 판의 가로-세로비(=a/b)와 폭-두께비(=b/t  $\sqrt{\sigma_0/E}$ )에 의해 결정되는 상수

식(4.1)의 적용에 앞서, 가로-세로비는 길이방향의 변(=a)을 x방향으로 하였기에, 항상 1보다 크다. 연속 보강판 부재의 좌굴을 계산할 때는 보강재에 대한 비틀림 강성이 보강판부재 단독에 대한 계산시 값의 반 만큼만 작용된다고 생각한다. 그 이유는 지지구조는 두 인근판의 하나에 대한 회전구속의 반이 기여하기 때문이다.

#### 5. 선저외판의 평가 및 고찰

판부재의 주변보강재의 회전강성을 고려하여 개발된 본 좌굴평가식은 그 제시방법의 정도를 검토하기 위하여 증명으로서 유한요소 해석결과와 비교하여 제시된 바 있다[5].

초기 구조설계 단계에서, 극심한 하중상태에 대한 선저외판의 좌굴강도를 평가하기는 쉽지 않다. 따라서, 본 연구에서는 판의 고유 회전강성을 고려했을 때 좌굴강도에 미치는 영향을 검토하였다.

즉 극심한 면내 및 면외하중과 주변 보강재효과를 고려하여 상기 계산에 따라 산출된 외판치수에 대한 평가(NEW 2)와 기존선급들(ABS,LR,DNV) 규정에 따른 결과, 그리고 1차연구[2]의 방법에 따른 결과(NEW 1 : 주변 경계조건을 길이방향의 변은 고정, 폭방향의 변은 단순지지로 하여 해석함)를 서로 비교 분석하여 보았으며 이들 각종 평가결과들을 토대로 실제 선저외판의 좌굴평가에 대한 실용성을 타진해 본다.

여기서는 비교목적으로 안전계수를 기존 선급들의 평가수준과 일치시켜 비교하였다.

Fig.5에서 Fig.7은 당사에서 건조된 산적화물선 선저외판의 평균적인 두께 및 치수를 가지는 판부재에 대하여 여러가지 좌굴평가식을 이용하여 최저판두께를 제시한 도표이며 재료는 각각 연강, HT32 그리고 HT36 이다.

본 그림에는 세 선급의 좌굴평가규정으로 평가된 결과를 같은 그림(Fig.5~7)내에 표시하였는데 영국(LR)과 노르웨이선급(DnV) 규정의 경우는 횡하중 및 주변보강재의 회전강성을 고려하지 않은 결과치이며, 미국선급(ABS)의 경우는 주변 보강재의 회전강성을 고려하지 않은 잠정규정을 사용하였다.

가로-세로비가 작은 경우에는, 본 연구결과의 곡선(NEW 1, NEW 2) 모두 타선급에 의한 결과치 보다 작은 선저판치수를 제시하고 있으나, 그 비가 증가할 수록 두꺼운 설계치를 제시한다. 이는 가로-세로비의 증가에 따라 같은 보강재를 사용하였으므로 상대적인

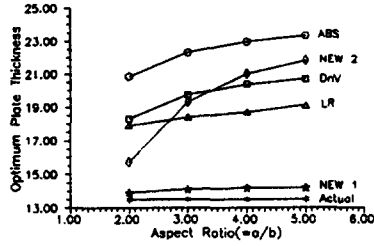


Fig.5 Optimum plate thickness of bottom plate of Bulk Carrier against the buckling (Mild steel)

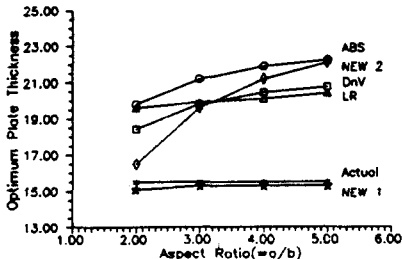


Fig.6 Optimum plate thickness of bottom plate of Bulk Carrier against the buckling (HT32)

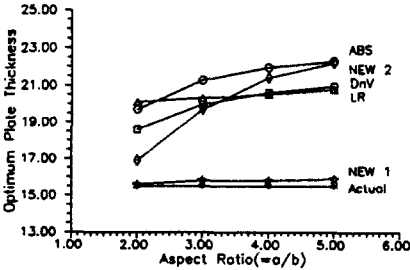


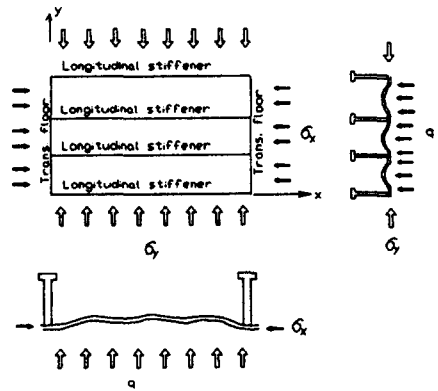
Fig.7 Optimum plate thickness of bottom plate of Bulk Carrier against the buckling (HT36)

보강재의 회전강성이 떨어짐에 기인한다고 생각된다. 그러나 횡하중도 고려된 미국선급규정에 비해 전반적으로 낮은 값을 보여준다.

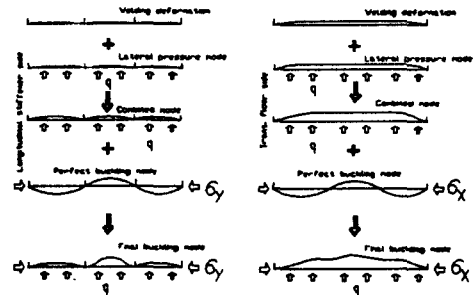
그러나 각 곡선들의 하단부에 실제 설계된 실적선들의 평균두께(actual)가 제시되어 있는 바와같이 예상되는 실제값과는 큰 차이를 발생시킨다. 이는 선저외판과 같이 연속적으로 구성된 판구조물인 경우에는 하나의 판이 단독으로 압축응력을 받는 경우로 해석하는 접근법에 무리가 있음을 뜻한다.

이를 보다 현실적인 단계에서 선저외판의 거동을 살펴본 예를 Fig.8(a) 및 (b)에 제시하여 보았다.

즉, 선저외판부재는 일차적으로 내부에 가로와 세로 방향으로 각각 횡늑골과 종방향보강재로 용접되어 용접에 따른 횡방향처짐을 선체내부방향으로 유발시킨다. 다음 단계로 선체가 만재상태에서 큰 파랑하중에



(a)



(b)

Fig.8 Simulated bottom plate behaviour subjected to severe lateral load and bi-axial inplane compression

로 인하여, 즉, Fig.1에 보이는 바와 같이 선체깊이에 상당하는 1파의 파랑하중에 의해 선체깊이가 거의 잠기는, 극심한 경우를 가정할 수 있다. 이 경우 선저외판은 선체깊이에 상당하는 횡방향 수압이 주어지므로 앞선 용접에 의한 처짐방향에 부가된 처짐을 야기하면서 횡수압과 힘의 평형을 이루게 된다.

그리고, 이에 부가하여 선체 길이방향의 굽힘과 이 중저의 횡굽힘에 의해 선저외판은 2축방향의 큰 면내하중이 작용하게 된다. 이들 면내 하중 중 선체횡방향 면내하중에 의해 1반파의 고유좌굴파형은 기존의 처짐과 합성되는데, 같은방향의 처짐일 경우는 처짐이 증폭되며, 반대방향의 경우도 초기용접에 의한 처짐과 횡수압에 의한 초기처짐거동에 의해 역방향의 처짐을

유발시키지 못한다고 볼 수 있다.

그리고 종방향의  $n$ 개의 반파로 구성되는 판의 고유 좌굴파형도 큰횡압과 초기치짐이 지배적인 치짐거동의 내부에서 미세한 파형양상을 보이거나 아예 초기파형속에 잠식되어버린다고 볼 때 판부재의 주변보강재 경계부는 단순지지상태의 경계조건보다는 거의 대칭조건의 상황에 가깝다고 생각된다.

특히, 판부재의 장변방향의 경계조건 상황이 판치수에 크게 영향을 미치므로, 이들 장변방향의 고정으로 취급하여선저외판에 대한 판두께 결정방법을 1차논문 [6]에서 제시한 바 있다.

## 6. 결론

최근에 선박구조설계에서 고장력강 사용이 증가되어오고 있고 이 결과 판 좌굴 문제가 전보다 크게 대두되고 있다.

이들 문제점 중의 하나인 선저외판의 좌굴강도특성을 주변보강재의 회전구속의 영향과 관련하여 다루어 보았다.

일차적으로 선저외판구조와 관련하여 당사 건조선을 중심으로 그 특성을 조사한 결과 선저외판 보강재의 비틀림강성은 일반적인 선박지지구조에 비해 비교적 작은 강성비를 보이며 거의 유사한 값을 가지고 있었다.

선박 판부재의 보다 합리적인 설계를 추구하기 위해 통상 주변을 단순지지로 평가되고 있는 현 시점에서 선박판부재의 주변보강재의 회전구속영향에 대한 보다 구체적인 접근을 예시하였으며 주변보강재의 비틀림강성까지 고려된 정확하고 효율적인 좌굴평가법을 사용하여 극심한 하중을 받는 산적화물선의 선저외판에 대해 평가하여 보았다.

이로부터 비틀림강성을 부여하여 평가한 결과는 횡하중을 고려하여 평가할수 있는 미국선급의 잠정평가식에 비해 항상 낮은 설계치값을 주나 횡하중을 고려할 수 없는 영국 및 노르웨이선급식을 상회하기도 한다. 즉 이들 두식의 설계치를 초과하는 이유는 횡하중의 고려가 되지 않은 탓이라 할 수 있다.

그 결과 가로-세로비의 증가에 따라 비틀림강성의 저하로 현저하게 두께의 증가를 초래하며 가로-세로비가 비교적 큰 경우에는 비틀림강성의 효과가 거의 나타나지 않는다. 따라서 일반적으로 비틀림강성의 효과에 의해 보다 경량화 설계가 될 수 있으나 그 정도는 미미하다고 본다.

실제 극심한 횡하중과 면내하중이 조합된 경우 초기

치짐과 큰 횡하중이 합세하여 뚜렷한 선체 내부방향의 치짐을 주도하는 가운데, 2축방향의 면내 압축력은 고유의 좌굴파형을 쉽게 표출하지 못하고 앞선 파형속에서 잔재하는 형상을 보이므로 주변의 경계조건은 긴변에서 대칭에 가까운 치짐형상을 유지한다고 생각할 수 있다.

또한 짧은 변의 지지보강재는 강력하고 큰 보강재로 고유의 비틀림강성이 크므로 고정에 가까운 경계조건이 부여될 수 있다고 본다.

선저외판의 가로-세로비는 3근처로 단변의 경계조건변화에 따른 판두께변화는 큰 차이가 없고 대부분 긴변의 경계조건 상황에 크게 좌우되며 이 경계조건의 변동을 근거로 한 판두께추정이 독립된 판의 주변보강재의 회전강성을 고려한 접근법 보다 합리적인 방법이라 생각되며 이에 관련한 추후의 선저외판에 대한 탄소성대변형 유한요소해석의 구체적인 평가로 본 선저외판 거동의 추정을 뒷받침 할 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] O.F. Hughes, "Ship Structural Design : A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach, John Wiley & Sons, 1983.
- [2] J.K. Paik, J.H. Ham and U.N. Kim, "A New Plate Buckling Design Formula", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.171, 1992.
- [3] J.K. Paik, J.H. Ham and J.H. Ko, "A New Plate Buckling Design Formula(2nd Report) - On the Plasticity Correction -", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.172, 1992
- [4] J.K. Paik, K.J. Lee and W.S. Kim, "A New Plate Buckling Design Formula(3rd Report) - On the Stiffener Restraints Effects -", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.174, 1993
- [5] J.K. Paik, J.Y. Kim, K.J. Lee and W.S. Kim, "A Practical Buckling Design Formula for Ship Platings Considering the Real Edge Condition", *J. of the Society of Naval Architects of Korea*, Spring Meeting, 1993
- [6] 함주혁, 백점기, "선박 선저외판의 좌굴특성에



- 관한 연구”, 대한조선학회 추계연구발표회, Nov., 1992.
- [7] Okada et al., “Compressive Strength of Long Rectangular Plates under Hydrostatic Pressure”, *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Autumn Meeting, 1979.
- [8] S.P. Timoshenko and J.M. Gere, “Theory of Elastic Stability”, McGraw-Hill International Book Co., Tokyo, 1982.
- [9] F. Bleich, “Buckling Strength of Metal Structures”, McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.