

# 선박 이중판의 보강법 연구

함주혁\*

\*한라대학교 시스템응용공학부

## A Study on the Reinforced Method of Doubler Plate in Ship Hull Structure

JUH-HYEOK HAM\*

\*School of System Applied Engineering, Halla University, Wonju, Korea

**KEY WORDS:** Axial, Biaxial In-plane Compression and Shear In-plane Load 일축, 양축 및 전단 면내 압축하중, Lateral Pressure Load 횡방향 수압하중, Doubler 이중판, Strength Evaluation 강도평가, Elasto-Plastic Analysis 탄소성 해석, Buckling Strength 좌굴강도

**ABSTRACT:** A study of the structural strength evaluation on the doubler plate, considering various load cases that were subjected to in-plane and out of plane combined load, has been performed through the systematic evaluation process. In order to estimate the proper static strength of doubler plate for various load cases, elasto-plastic large deflection analysis is introduced, including the contact effect between main plate and doubler. The characteristics of stiffness and strength variation are discussed, based on the results.

In order to compare the doubler structure with the original strength of main plate, without doubler, simple formulas for the evaluation of the equivalent flat plate thickness are derived for each load case, respectively, based on the additional series of analysis of flat plate structure. Using these derived equations, the thickness change of an equivalent flat plate is analyzed according to the variation of various design parameters of doubler platesome design guides are suggested in order to maintain the original strength of main plate without doubler reinforcement. Finally, correlation between derived equivalent flat plate formula and the developed buckling strength formulas are discovered, and these relations are formulated for the future development of simple strength evaluation formula of general doubler plate structure.

### 1. 서 론

본 논문은 선박 판부재의 강도손상시 강도보존을 위한 간편한 보수법으로 취약한 판부위에 다른 판을 겹쳐 보강하는 이중판 보강의 정적 강도의 설계에 대한 보강법 연구를 검토한다. 이를 위하여 종방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가(함주혁, 1999), 양축방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가(함주혁, 2000)와 양축방향 면내 압축력과 동시에 면내 전단하중(함주혁, 2001) 및 수압하중을 받는 경우를 종합하여 검토 정리하였다. 여기서 선박 판부재의 고려는 산적화물선의 이중저의 대표적인 판부재를 대상으로 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식 영향 등의 각종 파라메타 영향에 따른 이중판의 강도평가를 비선형 구조해석을 통해 분석한 결과를 이용하였다. 또한 이중판의 강도를 서로 비교하는 목적으로 이중판으로 보강된 판부재를 등가의 균일판 두께로 환산하여 그 두께의 변화정도를 감지하기 위해 판부재의 간이평가식(Paik et al., 1992a, 1992b)을 이용하여 등가의 좌굴강도

치를 평가하여 각 영향인자의 변화에 따른 설계 두께의 증감 정도를 검토하였다. 마지막으로 강도분석을 통한 설계 및 평가 지침 등을 제시하였다.

### 2. 이중판 강도 해석

여기서 종합적으로 다른 이중판의 강도평가는 네 단계로 종방향 면내 압축하중만을 받는 경우와 양축방향 면내 압축하중을 받는 경우, 양축방향 면내 압축력과 동시에 면내 전단하중을 받는 경우와 마지막으로 면내조합하중과 횡수압을 동시에 받는 네 경우에 대해 각각 해석을 수행하였으며 이들 각 경우의 하중의 증가에 따른 이중판의 하중-처짐 특성을 분석을 위해 가장 일반적인 판부재 모델을 선정하여 여러 가지 이중판을 부착하였고 이중판과 주판과의 접촉 효과를 고려하면서 이중판이 부착된 부위의 주판(main plate)부식의 영향, 이중판 두께의 영향, 이중판 폭 변화 그리고 길이 변화의 영향 등을 조사하였다.

제1저자 함주혁 연락처: 강원도 원주시 흥업면 흥업리 산66  
033-760-1236 jhham@hit.halla.ac.kr

#### 2.1 평가 대상 이중판 구조 및 평가 개요

Table 1과 같이, 살물선 이중저의 판부재로 길이방향이 늑판

간격(floor space) 그리고 판폭이 이중저 중늑골 간격(bottom longitudinal space)의 대표적인 값이라 볼 수 있는 판길이 대 폭 비인 판부재의 가로세로비 3을 선정하였고, 세장비는 이와 같은 비교적 대형선으로 볼 수 있는 구조에서는 화물하중 혹은 해수압 등의 큰 횡하중을 받게 되는 경우가 일반적이어서 구조는 세장치 못한(sturdy한) 구조이나 본 연구에서는 큰 횡하중을 무시한 양측 및 전단의 면내하중만을 고려하므로 일차적으로 비교적 세장한 판을 대상으로(세장비가 약 2.7) 기준 모델로 선정하였다.

Table 1 Typical floor and frame spaces of bulk carrier

(unit: mm)

| DWT                 | 25K  | 37K  | 47K  | 60K  | 70K  | 138K |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| Bottom longi. space | 785  | 800  | 800  | 910  | 765  | 900  |
| Floor space         | 2400 | 2280 | 2400 | 2400 | 2520 | 2400 |

후판 및 극심한 횡하중 등의 다양한 항목들에 대한 고려는 추후 연구에서 계속될 것이다. 경계조건은 주변 경계부가 직선을 유지하며 횡방향 즉 판에 수직방향만 구속하여 굽힘에 따른 면내 이동은 자유롭다고 가정하였다. 이 판의 중앙에 같은 두께의 판으로 판 면적이 1/4인 이중판이 부착되는 형식을 기준으로 삼았다. 판부재의 하중은, 양측 면내하중과 면내 전단 하중을 각각의 임계 좌굴 용력비로 점진적으로 증가시키면서 하중-처짐 거동을 분석하였고 비선형 해석은 Newton-Raphson 법을 채택하고 모델의 한 요소 크기 및 하중 증분 등의 비선형 풀이의 타당성은 그 해가 잘 알려진 이중판이 없는 판부재의 하중-처짐 거동으로부터 그 정확도를 확인하고 이 해석법을 차후의 다양한 해석에 계속 사용하였다. 해석의 정통성을 위해 개인적으로 개발한 프로그램을 지양하고 범용 프로그램으로 잘 알려진 MSCN4W-V4.0을 이용하였으며 판의 요소크기는 판폭의 1/16으로 잡고 모델링하였으며 이중판이 주판(main plate)과의 접촉효과는 갭요소를 사용하여 이상화시켰다. 이의 상세는 다음 절에서 언급한다.

2.2 이중판 접촉부 이상화

본 연구에서 판을 보강한 이중판은 주판(main plate) 위에 이중으로 설치되므로 두 판간의 간격이 멀어질 경우에는 무관하나 좁아지려 할 경우에는 그 접촉의 효과를 일반적으로 고려함이 타당하다. 따라서 본 연구에서도 이들의 효과를 고려키 위해 갭요소를 사용하여 주판과 이중판을 연결하여 그 접촉 효과를 구현하여 보았다. 본 해석에서는  $K_b$ 의 default값은  $K_a$  강성의  $10^8$ 배 정도로 다음과 같은 관계를 이용하여 산정하였다(Lee, 1990).

$$K_a \geq 1 \times 10^3 * \max[K(m), K(db)] \tag{2.1}$$

$$K_b \leq 1 \times 10^3 * \min[K(m), K(db)]$$

여기서,

$K_a: U_a-U_b \geq U_0$  일 때의 갭 닫힘강성(closed stiffness)

$K_b : U_a-U_b \leq U_0$  일 때의 갭 열림강성(open stiffness)

$K(m)$ : 이중판과 접촉하는 주판의 절점 국부강성

$K(db)$ : 주판과 접촉하는 이중판의 절점 국부강성

$U_a$  : a점의 갭축방향 이동량

$U_b$  : b점의 갭축방향 이동량

상기 식에서, 이중판과 주판이 접촉되는 한 점을 대상으로 주판과 이중판의 각 위치에서 그 접촉점을 a, b 각각으로 나타내었다. 갭요소의 축강성은  $U_a-U_b$ 의 값이  $U_0$  와 비교하여 bi-linear하게 변화한 갭요소에서의 힘과 변위는 통상 요소 좌표계로 양의 하중이 압축으로 고려되고 있으며 본 모델에서는 이중판과 주판의 절점을 횡방향으로 일치시킨 상태에서의 갭요소를 설정하고 초기갭 열림은 없는 것으로 하였다. 이들 주판과 이중판의 마찰력은 미소하다고 가정하여 무시하였다.

3. 등가 평판 두께 산정

주판 부식, 이중판 두께 변화 등 각 영향인자의 변화에 따른 하중-처짐 곡선의 변화와 강도의 증감의 영향은 각 하중별 각 파라메타별로 많은 경우의 수가 존재하므로(함주혁, 2001) 관련 내용은 본 논문에서는 생략한다.

여기서는 강도의 변화는, 같은 크기의 판부재에서 판두께의 변화와 직접관계가 있으므로 이들 강도의 변화량을 판두께의 설계변화에 얼마나 깊은 관계가 있는가를 살펴보기 위해 강도 변화치를 이중판이 없을 경우의 판부재 두께의 변화 정도로 검토하여 본다.

3.1 수치해석을 통한 등가 두께식의 도출

먼저, 이중판 강도의 영향을 판의 두께의 변화로 고찰하기 위해 이중판이 부착되지 않은 평판에 길이 및 폭 방향 면내 양측하중이 작용하면서 이중판과 같이 하중-처짐 곡선이 수평에 달할 때의 하중을 평판의 강도로 잡고 이 강도가 이중판의 강도와 같으면 등가 평판두께로 선정하여 각 파라메타의 변화에 따른 등가 평판 두께의 민감도를 조사하고자 한다.

이를 위해 각 평판두께의 변화에 따른 평판의 강도를 탄소성 수치해석을 통해 시리즈 해석하여 두께 별 평판두께의 강도치를 일축하중만이 작용할 경우, 양측압축하중이 작용할 경우 그리고 양측 면내하중과 전단력이 작용하는 경우의 3가지 평판등가두께와 강도와의 상관관계를 Table 2에서 Table 4까지 각각에 제시하였다.

**Table 2** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of uniaxial load

| Slenderness ratio, $\beta_F$ | $w_0 / t$ | $\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$<br>axial |
|------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| 2.459                        | 0.479     | 0.665                                |
| 2.516                        | 0.495     | 0.646                                |
| 2.576                        | 0.511     | 0.627                                |
| 2.639                        | 0.529     | 0.610                                |
| 2.704                        | 0.555     | 0.591                                |
| 2.774                        | 0.566     | 0.574                                |
| 2.847                        | 0.587     | 0.557                                |
| 2.924                        | 0.608     | 0.541                                |
| 3.005                        | 0.631     | 0.524                                |

**Table 3** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of biaxial in-plane load

| Slenderness ratio, $\beta_B$ | $w_0 / t$ | $\sigma_B / \sigma_0$<br>biaxial |
|------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 1.905                        | 0.325     | 0.498                            |
| 1.946                        | 0.340     | 0.466                            |
| 2.003                        | 0.356     | 0.436                            |
| 2.080                        | 0.378     | 0.393                            |
| 2.146                        | 0.392     | 0.364                            |
| 2.181                        | 0.411     | 0.338                            |
| 2.254                        | 0.422     | 0.313                            |
| 2.312                        | 0.438     | 0.289                            |
| 2.352                        | 0.455     | 0.266                            |

**Table 4** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of biaxial & shear load

| Slenderness ratio, $\beta_F$ | $w_0 / t$ | $\sigma_F / \sigma_0$<br>biaxial & shear |
|------------------------------|-----------|--|
| 2.459                        | 0.479     | 0.375                                    |
| 2.516                        | 0.495     | 0.355                                    |
| 2.576                        | 0.511     | 0.335                                    |
| 2.639                        | 0.529     | 0.317                                    |
| 2.704                        | 0.555     | 0.299                                    |
| 2.774                        | 0.566     | 0.283                                    |
| 2.847                        | 0.587     | 0.267                                    |
| 2.924                        | 0.608     | 0.252                                    |
| 3.005                        | 0.631     | 0.238                                    |

여기서, 평판의 초기 처짐값은 Jastrzebski Kmiecik의 상선의 계측치 값을 다음과 같이 사용하였다(Jastrzebski and Kmiecik, 1986).

$$\frac{\delta_0}{t} = 0.0094 (b/t) - 0.205 \quad (3.1)$$

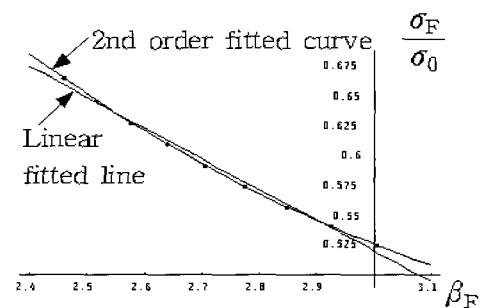
여기서,  $\delta_0$  : 판의 초기 처짐  
 b : 판의 폭  
 t : 판의 두께

마지막 하중인 면내조합하중과 면외 횡수압이 작용하는 경우에 대한 평판등가두께와 강도와의 상관관계를 Table 5에 제시하였다. 여기서, 평판의 초기 처짐값은 횡하중의 영향과 같은 형태로 포함시킬 수 있어 본 연구에서는 별도로 추가시키지 않았다.

**Table 5** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of in-plane combined load & lateral pressure load

| Slenderness ratio, $\beta_F$ | $\sigma_F / \sigma_0$<br>in-plane combined & pressure |
|------------------------------|---|
| 1.229                        | 0.521   |
| 1.258                        | 0.496   |
| 1.288                        | 0.472   |
| 1.319                        | 0.447   |
| 1.352                        | 0.424   |
| 1.387                        | 0.400   |
| 1.423                        | 0.379   |
| 1.462                        | 0.356   |
| 1.502                        | 0.334   |
| 1.545                        | 0.314   |
| 1.591                        | 0.293   |

이 제시된 표를 이용하여 각 하중 경우에 대해 Fig. 1에서 Fig. 4까지 그리고 식(3.2)에서 식(3.9)까지 세장비( $\beta_F$ )-하중( $\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$ )선도 및 관련 상관관계식을 다음과 같이 도출할 수 있다.



**Fig. 1** Correlation curve of flat plate between slenderness ratio,  $\beta_F$  and normalized stress,  $\sigma_F/\sigma_0$  in case of uniaxial load

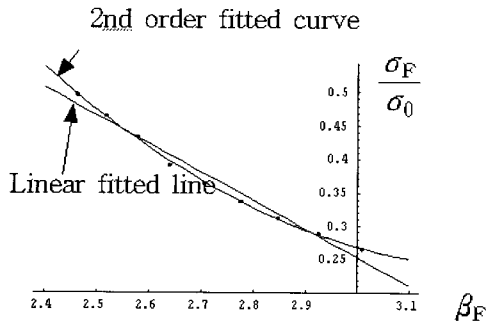


Fig. 2 Correlation curve of flat plate between slenderness ratio,  $\beta_F$  and normalized stress,  $\sigma_F/\sigma_0$  in case of biaxial in-plane load

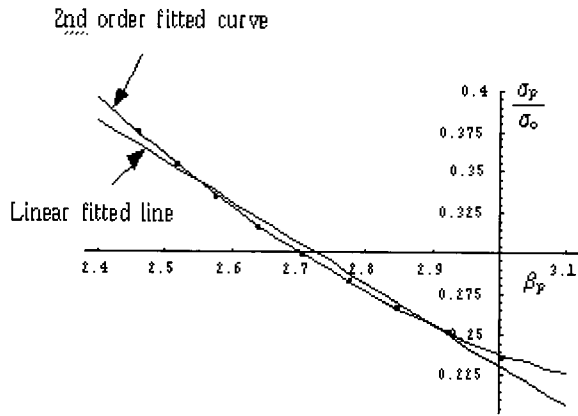


Fig. 3 Correlation curve of flat plate between slenderness ratio,  $\beta$  and normalized stress,  $\sigma_F/\sigma_0$  in case of biaxial and shear load

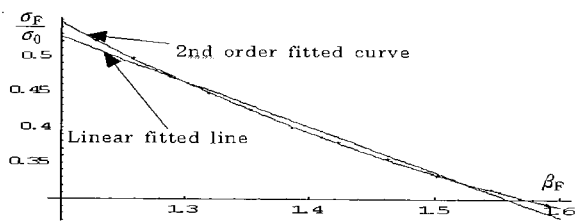


Fig. 4 Correlation curve of flat plate between slenderness ratio,  $\beta_F$  and normalized stress,  $\sigma_F/\sigma_0$  in case of in-plane combined load & lateral pressure load

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 2.284 - 0.987\beta_F + 0.134\beta_F^2 \quad (3.2)$$

$$\beta_F = 7.739 - 13.112\frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 7.782\left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (3.3)$$

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 4.395 - 2.533\beta_F + 0.386\beta_F^2 \quad (3.4)$$

$$\beta_F = 4.268 - 6.086\frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 4.967\left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 2.338 - 1.249\beta_F + 0.183\beta_F^2 \quad (3.6)$$

$$\beta_F = 4965 - 11.004\frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 11.538\left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (3.7)$$

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 2.571 - 2.473\beta_F + 0.655\beta_F^2 \quad (3.8)$$

$$\beta_F = 2.441 - 3.664\frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 2.578\left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (3.9)$$

여기서,  $\sigma_F$  : 등가 평판의 강도

$\beta_F$  : 등가평판의 세장비

$\sigma_0$  : 항복 응력

따라서, 이중판의 각 경우의 강도를 구하여 식(3.3), 식(3.5), 식(3.7) 및 식(3.9)의  $\sigma_F$ 에 대입하면 각 하중 경우에 대한 등가 평판의 두께에 대응하는  $\beta_F$ 가 도출된다. 따라서 상기 식들을 이용하여 이중판 구조와 등가의 강도를 가지는 등가 평판두께가 얻어질 수 있다.

### 3.2 등가평판 두께식과 좌굴강도식과의 상관관계 간이식 도출

판 두께 변화의 영향은 다음의 좌굴강도식(3.10)을 이용하여 강도변화에 따른 두께변화를 검토하여 보았다(Paik et al, 1992).

$$\Gamma_B = \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{R_{sx}\sigma_{xcr}} \right]^{a_1} + \left[ \frac{\sigma_y + \sigma_{rey}}{R_{sy}\sigma_{ycr}} \right]^{a_2} - \eta_a \leq 0 \quad (3.10)$$

여기서,

$\eta_a$  : 좌굴에 관한 안전계수(1.0으로 잡는다)

$\sigma_x, \sigma_y$  : 각각 판길이와 폭 방향으로 작용하는 압축응력  
(인장응력 작용시는 0으로 취급)

$\sigma_{xcr}, \sigma_{ycr}$ : 각각 판의 길이와 폭방향으로 축압축에 대한 임계 좌굴응력으로 이는 소성 수정인자에 의해 수정됨

$\sigma_{rex}, \sigma_{rey}$ : 각각 판의 길이와 폭방향의 잔류응력

$R_{sx}, R_{sy}$ : 전단하중 관련 인자(  $a_3, a_4$  변수로 포함)

$a_1 - a_4$ : 판의 가로-세로비(=a/b)와 폭-두께비(=b/t  $\sqrt{\sigma_0/E}$ )

에 의해 결정되는 상수

좌굴강도식은 압축력 단독만이 아니라 동시에 횡수압을 받는 경우 직사각형판의 거동으로부터 하중-처짐 곡선의 극소치를 나타내는 점을 탄성 좌굴강도로 정의하여 유도되었다(Paik et al, 1992).

$$\sigma_{xcr}^* = R_{qx} \cdot \sigma_{xcr} \quad (3.11)$$

여기서,

$\sigma_{xcr}^*$  = 횡수압과 길이방향으로 압축력이 동시에 작용할 때의 좌굴응력

$\sigma_{xcr}$  = 횡수압이 작용하지 않을 때의 길이방향 임계압축좌굴응력

$R_{qx}$  = x방향의 횡수압의 영향을 나타내는 파라메타  
 $= (1 + \alpha Q)^{1/2}$

$$\alpha = 0.025(a/b)^2 - 0.155(a/b) + 0.360$$

..... for  $\sqrt{2} \leq a/b < 4$

$$= 0.14 \quad \text{..... for } 4 \leq a/b$$

$$Q = qb^4/Et^4$$

탄소성 대변형 유한요소 해석결과를 바탕으로 도출된 판의 소성 수정식으로 다음을 이용하였다(Paik et al, 1992b).

$$\sigma_{cr} = \sigma_E \quad \text{..... } 0.5 > \sigma_E/\sigma_0 \text{ 영역}$$

$$= \sigma_0 \{-0.0847(\sigma_E/\sigma_0)^4 + 0.5857(\sigma_E/\sigma_0)^3 - 1.5631(\sigma_E/\sigma_0)^2 + 2.0784(\sigma_E/\sigma_0) - 0.2164\} \quad \text{..... } 0.5 \leq \sigma_E/\sigma_0 < 1.9 \text{ 영역}$$

$$= \sigma_0 \quad \text{..... } 1.9 \leq \sigma_E/\sigma_0 \text{ 영역} \quad (3.12)$$

여기서,

$\sigma_{cr}$  = 일축압축력이 작용할 때의 임계좌굴응력  
 (폭 혹은 길이방향 각각에 따라  $\sigma_{xcr}$  혹은  $\sigma_{ycr}$ )

$\sigma_E$  = 일축 압축력이 작용할 때의 Euler 탄성좌굴응력  
 (폭 혹은 길이방향 각각에 따라  $\sigma_{xE}$  혹은  $\sigma_{yE}$ )

$\sigma_0$  = 항복 응력

상기 식을 이용하여 수치해석을 통해 구한 평판의 강도를 좌굴강도라고 가정하여 상기 좌굴평가 식을 이용하여 좌굴강도를 만족하는 최소두께를 주는 세장비  $\beta$ 와의 관계를 Table 6에서 Table 9까지 각 하중 경우별로 정리하였다. 그리고 이를 Fig. 1에서 Fig. 4까지와 같이 곡선 좌표형식으로 함께 표현하면 하중( $\sigma_F/\sigma_0$ )-세장비( $\beta_F$ ) 선도는 Fig. 5에서 Fig. 8까지와 같이 각 하중별로 제시 될 수 있다.

**Table 6** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of uniaxial load

| Slenderness ratio, $\beta_B$ | $\omega_0 / t$ | $\sigma_B / \sigma_0$ |
|------------------------------|----------------|-----------------------|
| 2.817                        | 0.578          | 0.665                 |
| 2.877                        | 0.595          | 0.646                 |
| 2.972                        | 0.621          | 0.627                 |
| 3.039                        | 0.640          | 0.610                 |
| 3.109                        | 0.659          | 0.591                 |
| 3.182                        | 0.680          | 0.574                 |
| 3.258                        | 0.701          | 0.557                 |
| 3.339                        | 0.723          | 0.541                 |
| 3.423                        | 0.747          | 0.524                 |

**Table 7** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of biaxial in-plane load

| Slenderness ratio, $\beta_B$ | $\omega_0 / t$ | $\sigma_B / \sigma_0$ |
|------------------------------|----------------|-----------------------|
| 1.905                        | 0.325          | 0.498                 |
| 1.946                        | 0.340          | 0.466                 |
| 2.003                        | 0.356          | 0.436                 |
| 2.080                        | 0.378          | 0.393                 |
| 2.146                        | 0.392          | 0.364                 |
| 2.181                        | 0.411          | 0.338                 |
| 2.254                        | 0.422          | 0.313                 |
| 2.312                        | 0.438          | 0.289                 |
| 2.352                        | 0.455          | 0.266                 |

**Table 8** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of biaxial & shear load

| Slenderness ratio, $\beta_B$ | $\omega_0 / t$ | $\sigma_B / \sigma_0$ |
|------------------------------|----------------|-----------------------|
| 1.827                        | 0.303          | 0.375                 |
| 1.932                        | 0.328          | 0.355                 |
| 2.018                        | 0.352          | 0.335                 |
| 2.080                        | 0.378          | 0.317                 |
| 2.146                        | 0.397          | 0.299                 |
| 2.217                        | 0.411          | 0.283                 |
| 2.273                        | 0.427          | 0.267                 |
| 2.312                        | 0.443          | 0.252                 |
| 2.372                        | 0.455          | 0.238                 |

**Table 9** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio in case of in-plane combined load & lateral pressure load

| Slenderness ratio, $\beta_B$ | $\sigma_B / \sigma_0$ |
|------------------------------|-----------------------|
| 1.946                        | 0.521                 |
| 2.003                        | 0.496                 |
| 2.033                        | 0.472                 |
| 2.080                        | 0.447                 |
| 2.130                        | 0.424                 |
| 2.164                        | 0.400                 |
| 2.217                        | 0.379                 |
| 2.254                        | 0.356                 |
| 2.312                        | 0.334                 |
| 2.352                        | 0.314                 |
| 2.393                        | 0.293                 |

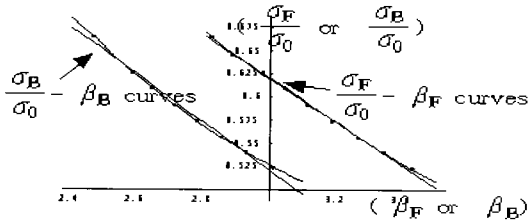


Fig. 5 Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress in case of uniaxial load

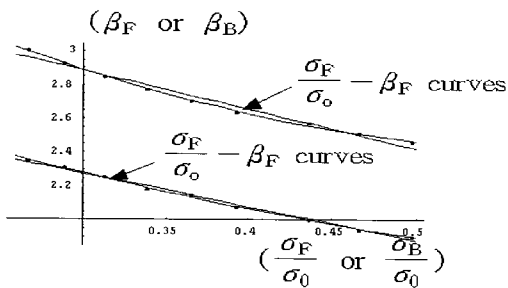


Fig. 6 Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress in case of biaxial in-plane load

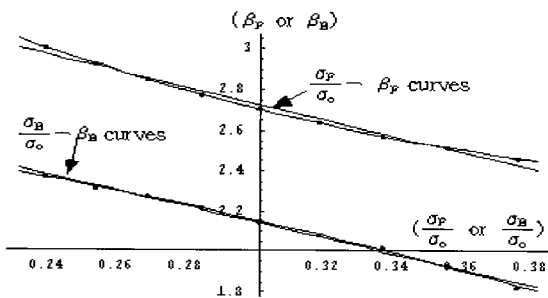


Fig. 7 Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress in case of biaxial & shear load

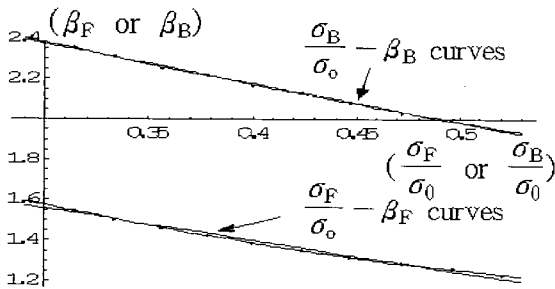


Fig. 8 Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress in case of in-plane combined load & lateral pressure load

상기 4 가지 경우의 각 그림으로부터 공히 두 곡선들 간에는 비교적 일정한 간격의 평행을 유지하고 있음을 알 수 있고 이들 관계를 다음 식(3.13)에서 식(3.16)으로 하중별로 각각 근사화 할 수 있다.

$$\beta_F = \beta_B + 0.6460 - 0.4201 \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \tag{3.13}$$

$$\beta_F = \beta_B - 0.7044 + 0.3198 \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \tag{3.14}$$

$$\beta_F = \beta_B - 0.6086 + 0.0773 \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \tag{3.15}$$

$$\beta_F = \beta_B - 0.9328 + 7.6791 \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \tag{3.16}$$

이로부터 수치해석을 통해 도출한 식(3.3), 식(3.5), 식(3.7) 및 식(3.9)과 마찬가지로 좌굴 평가식을 이용한 식(3.13)에서 식(3.16)까지를 이용하여 각 하중 경우별로 평판의 등가두께를 도출 할 수 있다.

#### 4. 각종 하중조건의 변화에 따른 영향 분석

각종 하중-처짐 곡선을 얻고 이들을 상호 비교하기 위하여  $p-w^2$  등의 강도 기준점도 있지만 보다 명확한 비교점을 선택하기 위해 하중-처짐곡선의 기울기가 0이 되는 점을 강도의 기준점으로 잡고 서로의 결과를 비교하였다.

2.1절에서 언급한 기준 이중판 모델을 표준모델로 삼고 각 하중조건을 변화시켜 검토하여 보았다. 여기서는 초기변형과 잔류응력의 효과를 고려하지 않았으나 후반부의 등가두께판 산정시 초기변형 효과를 고려하였다.

비교적 세장한 직사각판의 설계 및 강도평가 지침을 다음과 같이 정리하였다. 여기서, 횡축은 각 파라메타는 주판길이에 대한 이중판 길이( $a_d/a$ ), 주판두께에 대한 이중판 두께( $t_d/t$ ), 주판 폭에 대한 이중판 폭( $b_d/b$ ) 그리고 주판두께에 대한 이중판 부식두께( $t_c/t$ ) 각각의 무차원화된 값을 나타내며 종축은 주판두께에 대한 등가 평판두께( $t_{eq}/t$ )의 무차원화된 값을 나타낸다(함주혁, 2000).

##### 4.1 일축 압축 하중의 영향

여 각 파라메타의 변화에 따른 강도 변화를 앞서 도출한 등가 평판 두께의 변화로 대체하여 표시하면 좌변의 Fig 9과 같다.

본 그림으로부터 일축 면내하중을 받는 이중판으로 보강된 비교적 세장한 직사각판에 대한 설계 및 강도평가 분석을 통해 다음과 같이 정리할 수 있다.

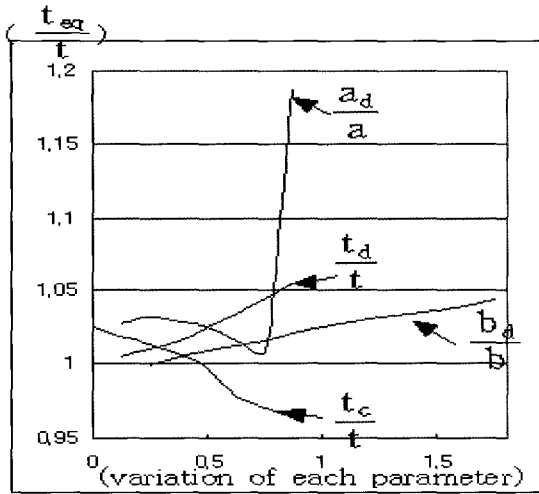


Fig. 9 Equivalent flat plate thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate in case of uniaxial load

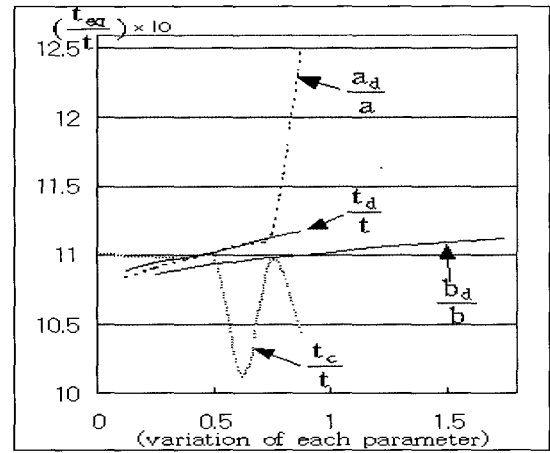


Fig. 10 Equivalent flat plate thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate in case of biaxial in-plane load

- 상기 그림으로부터 무차원화된 등가 평판두께를 지지하는 3곡선, 즉 이중판 두께( $t_d$ ) 및 폭( $b_d$ ) 그리고 주판의 부식( $t_c$ )을 표시하는 무차원 곡선들이 약 0.96-1.06 사이에 분포하고는 반면 길이 방향으로 이중판이 길게 보강되는 경우 급격하게 등가두께를 거의 20% 상승시키고 있음을 알 수 있다 따라서 본 연구에서 다루고있는 일반적인 이중판 보강은 등가 평판의 판두께의 변화를 10% 정도 변화시키는 강도 범위 내에 존재하나 이중판 보강으로 강도 및 강성의 극대화를 위해서는 이중판의 길이를 판길이의 80%-90%로 증대시켜 15%-20%의 등가 평판두께의 증가효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다.
- 길이방향 면내 축하중이 지배하는 하중 경우 길이방향의 이중판 확대는 그 길이가 짧은 경우에는 다른 보강법에 비해 상대적으로 강도의 변화가 상대적으로 미미하다.
- 이중판 두께 및 폭의 증감에 따른 강도의 영향은 비교적 유사하며, 거의 직선적 변화를 보인다.
- 주판의 부식에 따른 강도의 감소 곡선은 이중판 두께를 주판두께와 동일하게 놓고 이중판 면적을 주판의 1/4로 표준면적을 유지한 상태로 구축된 곡선이므로 최대 3%-4%의 등가 평판 두께의 감소를 야기시키나 이중판 두께 및 폭의 증감에 따른 강도의 영향곡선으로 비추어 볼 때 이중판의 폭과/혹은 두께를 증가시켜서 적어도 부식되지 않은 주판만의 평판두께의 강도를 쉽게 유지시킬 것으로 생각되며 보다 큰 강성을 확보하기 위해 이중판의 길이 확대가 필요하다고 생각된다

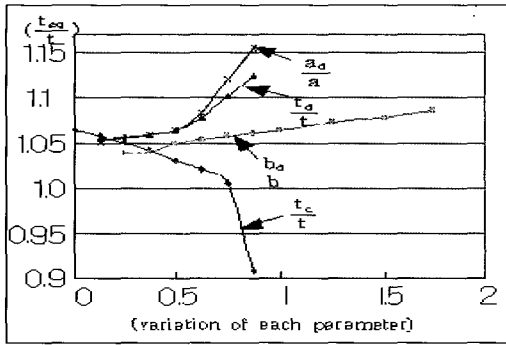
4.2 양축 압축 하중의 영향

Fig. 10으로부터 양축 면내하중을 받는 이중판으로 보강된 비교적 세장한 직사각판에 대한 설계 및 강도평가 분석을 통해 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 상기 그림으로부터 길이 방향으로 이중판이 길게 연장된 경우를 제외하면 무차원화된 등가 평판두께를 지지하는 3곡선, 즉 이중판 두께( $t_d$ ) 및 폭( $b_d$ ) 그리고 주판의 부식( $t_c$ )을 표시하는 무차원 곡선들이 약 101%-112% 사이에 분포하고 있어 앞서 발표한 논문인 일축 길이방향 면내압축의 경우인 96.5%-105.5%(함주혁, 1999)보다 등가평판두께의 입장에서 보강 효과가 높으며 양축 방향 면내 압축하중에 대한 이중판 보강은 등가 평판의 판두께의 변화를 일축압축의 경우에 비해 크게 야기시킨다고 볼 수 있다.
- 특히 길이 방향으로 이중판이 길게 보강되는 경우 급격하게 등가두께를 약 25% 상승시키고 있음을 알 수 있다 따라서 본 연구에서 다루고있는 일반적인 이중판 보강은 등가 평판의 판두께의 변화를 10% 정도 변화시키는 강도 범위 내에 존재하나 이중판 보강으로 강도 및 강성의 극대화를 위해서는 이중판의 길이를 판길이의 80%-90%로 증대시켜 15%-25%의 등가 평판 두께의 증가효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다.
- 양축 방향 면내 축하중이 지배하는 경우 길이방향의 이중판 확대는 그 길이가 극히 긴 경우에 급격한 강도의 증가를 보이 나 이를 제외하고는 다른 보강법 특히 보강판의 두께 및 폭 변화에 따른 등가평판두께의 변화폭이 유사한 범위에 존재한다고 볼 수 있다.
- 두께 및 폭의 증감에 따른 영향은 강도가 유사하며, 거의 직선적 변화를 보이는 것은 일축면내하중의 경우와 유사하다.
- 주판의 부식에 따른 강도 감소가 다른 영향인자에 비해 상대적으로 현저하나 이중판으로 보강되지 않은 새판의 경우에 비해 강도는 떨어지지 않는다고 볼 수 있으며 이중판 길이의 증가로 보다 큰 강도를 확보할 수 있다.

**4.3 양축 압축 및 전단 하중의 영향**

양축 및 전단 면내하중이 작용하는 경우 파라메타의 변화에 따른 강도 변화를 앞서 도출한 등가 평판 두께의 변화로 대치하여 표시하면 다음 Fig 11와 같고 다음과 같은 특성을 보인다.



**Fig. 11** Equivalent design thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate in case of biaxial & shear load

- 주판의 극심한 부식의 경우를 제외하면 각 파라메타 변화에 따른 등가 평판두께가 약 100%-115% 사이에 분포하고 있어 일축 길이방향 면내압축의 경우(96.5%-105.5%)(함주혁, 1999) 보다 등가평판두께의 입장에서 보강 효과가 높으며 양축방향 및 전단의 면내 압축하중에 대한 이중판 보강은 비교적 세장한 등가 평판의 판두께의 변화를 일축압축의 경우에 비해 크게 야기시킨다고 볼 수 있다.

- 양축 및 전단력이 작용하는 본 해석의 경우 길이 및 두께의 이중판 확대는 그 길이 및 두께가 비교적 큰 경우에 급격한 강도의 증가를 보이거나 이를 제외하고는 다른 보강법 특히 보강판의 폭변화에 따른 등가평판두께의 변화폭이 유사한 범위에 존재한다고 볼 수 있다.

이중판 폭의 증감에 따른 영향은 강도가 유사하며, 거의 직선적 변화를 보인다.

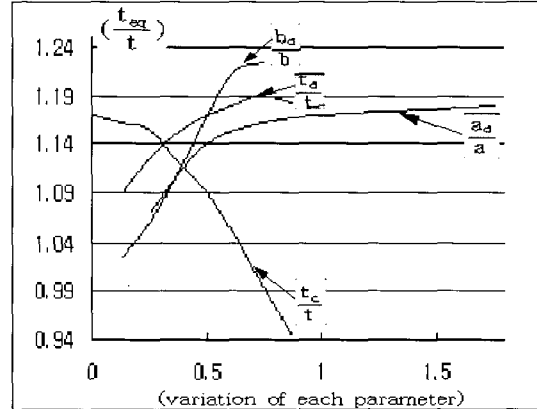
- 주판의 부식에 따른 강도 감소가 다른 영향인자에 비해 상대적으로 현저하다.

**4.4 면내 조합하중 및 수압의 영향**

- 본 해석의 경우 Fig. 12에 제시된 바와 같이 길이 및 두께의 이중판 보강은 그 길이( $a_d$ ) 및 두께( $t_d$ )가 비교적 큰 경우에 완만한 강도의 증가를 보이거나 작은 경우는 상대적으로 강도의 증가가 가파르며 증감 영역이 유사하다.

- 이중판 폭( $b_a$ )의 증감에 따른 영향은 증감영역이 가장 크고 가파르며, 최대 이중판폭(판폭의 87.5%)의 경우를 제외하고는 거의 직선적 변화를 보인다.

- 주판의 부식( $t_c$ )에 따른 강도 감소가 상대적으로 현저하며 약 7%에서 17%의 큰 영역의 등가두께 변화를 보인다.



**Fig. 12** Equivalent flat plate thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate in case of in-plane combined load & lateral pressure load

- 상기 그림으로부터 주판의 극심한 부식의 경우를 제외하면 무차원화된 등가 평판두께를 지시하는 3곡선, 즉 이중판 길이( $a_d$ ), 두께( $t_d$ ) 및 폭( $b_a$ )을 표시하는 무차원 곡선들이 약 102%-123% 사이에 분포하고 있어 앞서 발표한 논문인 일축 길이방향 면내압축의 경우 96.5%-105.5%(함주혁 1999) 그리고 양축면내압축의 경우 101%-112%(함주혁 2001) 보다 등가평판 두께의 입장에서 보강 효과가 높으므로 면내 조합하중과 수압을 동시에 받는 경우의 이중판은 일축 및 양축압축의 경우에 비해 등가두께 효과로 볼 때 보강 효과가 비교적 크다고 말할 수 있다.

**4. 결 론**

이중판의 집속 효과를 고려하여 면내 일방향 압축하중, 양방향 압축하중, 양방향과 전단 면내하중 그리고 면내조합하중과 횡수압을 받는 4가지 하중경우에 대해 대표적 선박 판부재의 강도평가를 실시하였다. 이들 각 세단계의 하중 경우 각각을 대상으로 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식의 영향 등 각종 파라메타의 영향에 따른 이중판의 강도평가를 비선형 구조해석을 통해 이중판 보강의 각종 파라메타에 따른 보강효과를 고찰하기 위해 등가평판의 강도해석을 수행하고 각 파라메타의 영향에 따른 강도변화를 비교분석하였다.

이들 시리즈해석 결과를 바탕으로 4가지 특정 하중에 따른 이중판의 강도평가식을 도출하였으며 판부재의 간이 평가식에 이중판 판부재의 평균두께의 개념으로 취급하여 좌굴강도치를 평가하고 등가평판 도출식과의 상관관계를 고찰하였으며 판부재의 간이평가식으로부터 이중판 보강에 따른 등가평판두께의 도출식을 역시 개발하였다. 또한 등가평판두께 도출식으로부터 각종 파라메타의 변화에 따른 강도의 변화를 등가 평판두께로 제시하였고 이로부터 각 하중 경우별 이중판 강도 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.



일축 면내 압축하중의 경우는 각 파라메타변화에 따른 등가 평판두께의 비교를 통해, 본 연구에서 다루고있는 일반적인 이중판 보강은 등가 평판의 판두께의 변화를 10% 정도 변화시키는 강도 범위 내에 존재하나 이중판 보강으로 강도 및 강성의 극대화를 위해서는 이중판의 길이를 판길이의 80%-90%로 증대시켜 15%-20%의 등가 평판두께의 증가효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이중판의 폭과/혹은 두께를 증가시켜서 적어도 주판(main plate)이 손실 혹은 부식된 경우에 이중판의 폭 및 두께 증대를 통한 보강으로 등가평판두께의 정적 강도를 쉽게 유지시킬 것으로 생각되며 보다 큰 강성 및 강도의 확보하기 위해서는 이중판의 길이를 확대시키는 방법이 효과적이다.

양축면내 압축을 받는 하중의 경우는 다음과 같이 요약된다. 각 파라메타 변화에 따른 등가 평판두께의 비교를 통해, 본 연구에서 다루고있는 일반적인 이중판 보강은 등가 평판의 판두께의 변화를 11% 정도 변화시키는 강도 범위 내에 존재하나 이중판 보강으로 강도 및 강성의 극대화를 위해서는 이중판의 길이를 판 길이의 80-90%로 증대시켜 15-25%의 등가 평판두께의 증가효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이중판의 폭과/혹은 두께를 증가시켜서 적어도 주판(main plate)이 손실 혹은 부식된 경우에 이중판의 폭 및 두께 증대를 통한 보강으로 등가평판두께의 정적 강도를 쉽게 유지시킬 것으로 생각되며 보다 큰 강성 및 강도의 확보하기 위해서는 이중판의 길이를 확대시키는 방법이 효과적이다.

양축 및 전단하중이 동시에 작용할 경우는 주판의 부식이 큰 경우를 제외하면 각 파라메타 변화에 따른 등가 평판두께가 100%-115% 사이에 분포하고 있어 양축방향 면내 압축 및 전단하중에 대한 이중판 보강은 비교적 세장한 등가 평판의 판두께의 변화를 일축압축의 경우에 비해 크게 야기시킨다고 볼 수 있다. 본 복합하중의 경우 길이 및 두께의 이중판은 그 치수가 비교적 큰 경우에 급격한 강도의 증가를 보이나 이를 제외하고는 다른 보강법 특히 보강판의 폭변화에 따른 등가평판두께의 변화폭이 유사하다. 이중판 폭변화에 따른 등가두께의 변화는 직선적 변화를 보이고 있다.

마지막으로 면내 조합 및 면외 수압 하중의 경우 길이 및 두께의 이중판은 그 치수가 비교적 큰 경우에 급격한 강도의 증가를 보이나 이를 제외하고는 다른 보강법 특히 보강판의 폭변화에 따른 등가평판두께의 변화폭이 유사하다. 이중판 폭변화에 따른 등가두께의 변화는 직선적 변화를 보이고 있다. 본 고려 하중의 경우 길이 및 두께의 이중판은 그 치수가 비교적 작은 경우에 급격한 강도의 증가를 보이나 이를 제외하고는 강도의 완만한 상승을 보인다. 이중판 폭변화에 따른 등가두께의 변화는 직선적 변화를 보이고 있다. 주판의 부식이 큰 경

우를 제외하면 각 파라메타 변화에 따른 등가 평판두께가 102%-123% 사이에 분포하고 있다고 볼 수 있어 면내 조합하중과 수압을 동시에 받는 경우의 이중판은 일축 및 양축 면내 압축의 경우에 비해 등가두께 효과로 볼 때 보강 효과가 비교적 크다고 말할 수 있다.

본 연구에서 연구의 간편화, 단순화를 위해 가정되어 고려될 수 없었고 많은 해석 및 분석 작업이 요구되는 구조부위별 다양한 가로세로비, sturdy한 치수, 용접부의 응력집중 및 강도, 피로강도 등의 연구를 개발 이론 및 간이식의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 실험과 더불어 단계별 연구를 진행하고 이를 통합시키고자 한다.

## 참 고 문 헌

- 함주혁 (1999). "종방향 면내압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가", 1999년도 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 471-474.
- 함주혁 (2000). "양축방향 면내압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가", 2000년도 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 255-258.
- 함주혁 (2001). "양축방향 면내압축과 전단하중을 받는 선박 이중판의 강도 평가", 한국해양공학회지 제15권 제1호, pp 85-91.
- 함주혁, 백점기, 고재현 (1992). "판의 좌굴 설계 공식에서의 소성 수정에 관하여", 선박 구조 연구회 연구발표논문집, Sep, 1992.
- Jastrzebski T. and Kniecik M. (1986). "Statistical Investigations of the Deformations of Ship Plates", Bull. Assoc. Tech. Marit. Aeronaut., 86, pp 325-345.
- MSC/NASTRAN for Windows, Release Guide Version 4
- Lee S.H. (1990), MSC/NASTRAN Handbook for Nonlinear Analysis, Version 67(Draft).
- Paik J.K., Ham J.H. and Kim U.N. (1992a). "A New Plate Buckling Design Formula", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 171, pp 559-566,
- Paik J.K., Ham J.H. and Ko J.H. (1992b) "A New Plate Buckling Design Formula(2nd Report) - On the Plasticity Correction", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 172, pp 417-425.

2003년 8월 5일 원고 접수

2003년 9월 29일 최종 수정본 채택