

면내 전단하중과 양축압축하중을 받는 선박 판부재의 이중판 설계시스템 개발

함주혁
한라대학교 메카트로닉스공학과

Development of Doubler Design System for Ship Plate Members Subjected to In-plane Shear and Biaxial Compressive Loads

Juh-Hyeok Ham
Department of Mechatronics Engineering, Halla University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A design system for doubler reinforcement of the ship plate members subjected to in-plane shear and biaxial compressive loads was developed. This design system of doubler reinforcement on ship plate members established by design supporting system and this system was based on the buckling evaluation process of ship plate members for these in-plane loads. Each design parameters were suggested by equations as the form of influence coefficients for the doubler reinforcement subjected to the various in-plane loads including shear load. Strength of doubler plate member reinforced on the plate member could be suggested by the equivalent flat plate thickness after the consideration of correlation equations in the design system of doubler reinforcement. Level of strength recovery of ship plate members for these in-plane loads according to the local reinforcement by doubler could be suggested by use of this design system in the initial repair design stage of shipyards.

Keywords : Doubler structural design system(이중판 구조설계시스템), Equivalent plate thickness(등가 판두께), In-plane shear and biaxial compressive loads(면내 전단과 양축압축 하중)

1. 서론

선박 판부재의 부식에 의한 손상 등 다양한 원인에 기인한 판부재의 강도 감소에 따른 강도 복원을 위해 직사각형 이중판을 부착하는 이중판 보강법을 연구하는 단계에서 기존의 연구들은 단일 축방향 면내하중 (Ham, 2014)이나 양축 면내압축하중 등 축방향 면내압축하중에 국한하여 연구 (Ham, 2016)를 수행하였다. 본 연구에서는 일반적인 이중판 보강이 보다 다양한 면내하중들에 적용될 수 있게 면내 전단력과 양축방향 압축력이 동시에 작용하는 경우에 이중판 보강이 상대적으로 합리적이고 용이한 방법으로 제시될 수 있는 설계시스템을 구축하고 그 적용 예를 간략히 소개한다.

2. 이중판 보강 선박판부재 개요

본 연구에서는 대형조선소에서 건조한 실적이 많은 산적화물

선의 종보강재와 늑판의 간격 범위 내에서 한 선박판부재로 관점을 국한시켜 판부재의 이중판 보강설계를 고려해본다. 그 대표적인 값으로 실적선의 다양한 조사 분석을 통해 일반적으로 상선의 대표성이 있다고 사료되는 산적화물선의 이중저 구조를 대상으로 선박 단일판부재의 가로세로비를 3을 사용하였고 시스템 구축의 기본 단계로 비교적 세장한 판부재(세장비 약 2.7)를 기준으로 판부재 모델로 선정 (Ham, 1999)하였다.

이중판 보강법은 부식 등 다양한 원인으로 강도 상 취약해진 기존 판 영역을 새 판으로 겹쳐서 강도를 유지하는 하나의 간편 보강방법이다. 이 보강은 덧붙는 구조형태로 강도상의 단점이 있으나 큰 설치물이 있는 하부 판부재의 교체 시 크레인 탑재 공정 등 많은 인건비가 소요되는데 반해 이중판 보강법은 그 간편성과 수리비용 절감의 장점이 매우 커 비교적 반복하중의 영향이 미미한 종강도 부재 외에는 적용 가능성이 있다고 보아 이러한 판구조 부재를 대상으로 본 연구에서 면내 전단력과 양축압축력을 동시에 받는 이중판 설계시스템을 구축코자한다. 이중판으로 보

강된 선박 판부재의 개요는 Fig. 1과 같다. 직사각형 주판(main plate) 상부에 국부적으로 이중판이 놓이고 그 주변이 용접으로 주판에 부착되면서 보강되는 구조이다. 본 그림에서의 기호를 설명하면 직사각형 주판의 폭(b)과 길이(a)는 각각 늑판 간격(floor space)과 종방향 보강재의 간격(Longi. space)이며 주판에 판의 보강을 위해 주판 위에 부분적으로 덧붙는 직사각형 이중판의 길이(a_d)와 폭(b_d)은 각각 주판의 길이와 폭방향의 직사각형태의 이중판 치수이다. a_d/a 는 주판 길이에 대한 이중판 길이의 비이며 b_d/b 는 주판 폭에 대한 이중판 폭의 비이고 t_d/t 는 주판 두께에 대한 이중판 두께의 비이다. 마지막으로 t_c/t 는 주판 두께에 대한 이중판의 부식두께의 비이다. 판부재의 중앙부에 판부재와 동일한 두께인 1/4 면적의 직사각형 이중판이 부착된 이중판 보강 판부재를 기준으로 이중판 길이(a_d), 폭(b_d), 두께(t_d) 그리고 주판의 부식두께(t_c)를 변화시킨 경우의 강도변화를 설계시스템에 고려하였다.

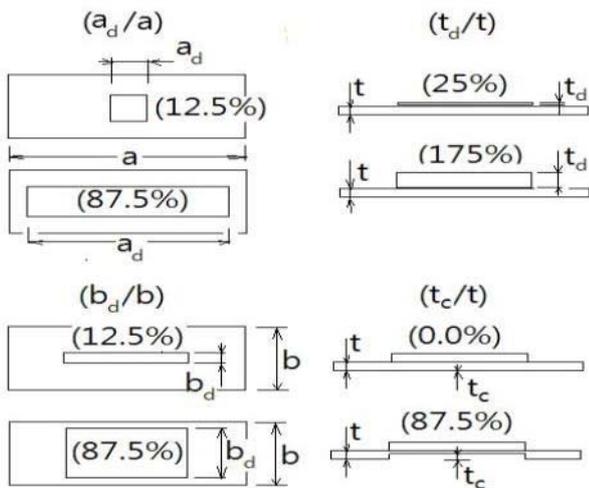


Fig. 1 Ship plate member reinforced by rectangular doubler plate

3. 설계 정식화

3.1 이중판 보강 판부재의 등가평판 두께

먼저, 이중판 보강 판부재에 대한 강도의 영향을 보다 간편하게 취급하기 위해 먼저 등가평판두께의 개념을 고려해 보았다. 즉, 이중판 보강 판부재의 강도가 이중판이 없는 일반 판부재의 좌굴강도와 같으면 그 때의 판부재 좌굴두께를 이중판 보강 판부재의 등가평판두께로 선정하였다. 이 때 작용되는 다양한 면내하중이 있으나 일반적으로 면내 굽힘응력은 대부분 미소하여 무시하고 이중판이 부착된 판부재의 면내 전단력과 양축 압축력을 대상으로 각 하중의 임계 좌굴 응력비로 점진적으로 증가시키면서 하중-처짐 거동을 분석하였다. 그리고 평판의 등가두께 선정에는 이중판 부착판의 강도와 대등한 등가 판두께를 산출하였다. 본

논문에서 기 언급한 직사각형 주판의 부식부에 부착되는 보강판의 길이, 폭, 두께 그리고 주판에 이중판 부착부의 부식된 주판의 평균두께 등, 각 설계인자의 변화에 따른 등가평판두께의 좌굴강도 관련 민감도를 살펴보기 위해 각 평판두께의 변화에 따른 평판의 강도를, 주판과 이중판 간의 겹소를 사용하여 접촉 효과를 고려 (Ham, 2001)하면서 면내 전단력과 양축 압축력을 받는 이중판의 탄소성 비선형 수치해석을 수행하였다. 본 수치해석의 시리즈해석을 통한 그 일단계로 두께별 평판두께의 강도치를 Table 1와 같이 얻었다. 여기서 언급된 세장비 영역은 이중판 두께 등 각종 영향인자의 변화에 따른 등가이중판부재의 세장비의 변화영역이며 선박평판의 초기치침차는 상선의 계측값 (Jastrzebski & Kimiecik, 1986)을 이용하였다.

Table 1 Strength of the equivalent flat plate

Slenderness ratio, β_F	δ_0/t	σ_F/σ_0
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

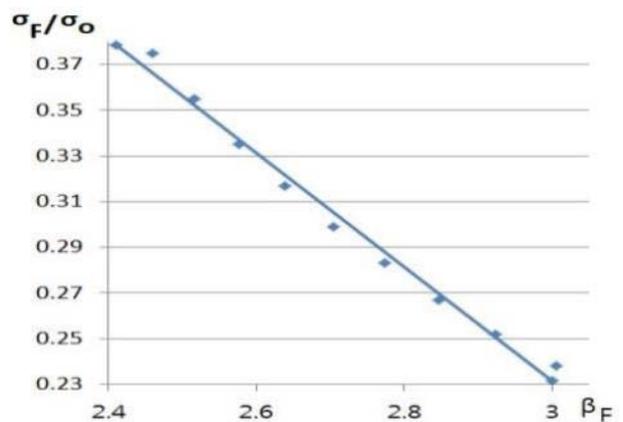


Fig. 2 Correlation of flat plate between slenderness ratio, β_F and normalized stress, σ_F/σ_0

Table 1을 사용하여 앞 그림(Fig. 2)와 같은 세장비(β_F)-응력(σ_F/σ_0)선도를 간단히 기울기 -0.249 이고 절편이 0.978 인 1차식(공분산(cov) 6.38×10^{-6})으로 표시될 수 있으며 보다 정확성을 위해 세장비(β_F), 응력(σ_F/σ_0)항의 다음의 식 (1) 혹은 식 (2)의 2차식 형태로도 표시될 수 있다.

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 2.338 - 1.249\beta_F + 0.183\beta_F^2 \quad (1)$$

$$\beta_F = 4.965 - 11.004\frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 11.538\left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, σ_F : 단일 등가평판부재의 강도
 β_F : 단일 등가평판의 세장비
 σ_0 : 항복응력

따라서, 이중판이 면내 전단력과 양축압축력을 받는 경우의 좌굴강도로부터 식 (2)의 σ_F 에 대입하면 얻어진 평판의 세장비 (β_F)로 단일 등가평판의 두께가 산출된다. 이로부터 이중판 구조와 강도 상 등가하는 평판두께를 도출할 수 있다.

3.2 이중판 보강 등가평판 두께의 도출

등가평판 강도와 이중판 간의 상관관계를 조사하기 위해 수치 해석을 통해 얻은 등가의 평판강도를 보이는 세장비는 좌굴강도 식을 이용하여 계산하였다. 각 좌굴하중, σ_B 에 대응하는 세장비 β_B 와의 상관관계를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Correlation between the normalized buckling stress and the slenderness ratio

Slenderness ratio, β_F	δ_0/t	σ_B/σ_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 2를 Fig. 2와 같은 축좌표 형태로 표현하면 세장비 (β_F)-응력(σ_F/σ_0)선도는 Fig. 3과 같다. 이 그림에서 두 곡선 간에 일정 간격을 유지하면서 평행하는 상관관계가 있어보이므로 이를 다음의 선형적인 식 (3)의 형태(공분산 2.00×10^{-6})로 근사화하였다.

$$\beta_F = \beta_B - 0.609 + 0.077\frac{\sigma_B}{\sigma_0} \quad (3)$$

여기서, σ_F : 평판부재의 강도
 σ_B : 이중판부착 평판부재의 강도

β_F : 등가평판부재의 세장비
 σ_0 : 항복응력

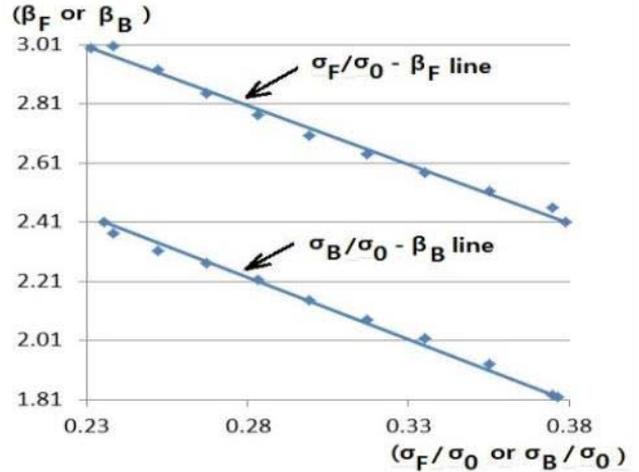


Fig. 3 Correlation curve of the strength between flat plate and doubler plate

이를 통하여 수치해석 결과 도출한 식 (2)과 마찬가지로 판부재의 좌굴평판강도와 상관관계에서 도출한 식 (3)을 통해 면내 전단력과 양축압축력을 받는 이중판구조에 대한 등가평판두께를 산출할 수 있다.

3.3 등가두께 설계식의 도출

단일 이중판부재의 파라메타 변경에 의한 좌굴강도 변동을, 등가판두께의 영향으로 바꾼 결과로부터 단일 평판의 등가두께를 산출해 낼 수 있다. 따라서 단일 이중판에 대한 각종 파라메타의 영향을 파악하려고 단일 이중판에 대한 등가두께 산출 목적으로 파라메트릭 연구 결과 (Ham, 1999; 2001)로부터 도출 가능성을 언급한 바 있어 이를 근거로 본 연구에서는 단일 이중판 구조를 등가평판두께 형태로 표시하기 위해 각 파라메타를 근사화한 영향계수 형태로 네 가지 영향계수인 K_{t_c} , K_{t_d} , K_{b_d} 그리고 K_{a_d} 를 도입하고 식 (4)와 같이 면내 전단력과 양축압축력을 받는 등가두께 산출 식을 제시하였다.

$$t_{eq} = K_{t_c} K_{t_d} K_{b_d} K_{a_d} t_F \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_{t_c} &= -0.064t_d/t + 1.062 \text{ for } 0 \leq t_d/t \leq 0.75 \\ &= 0.654a_d/a + 0.515 \text{ for } 0.75 \leq t_d/t \leq 0.875 \\ K_{t_d} &= 0.031t_d/t + 1.032 \text{ for } 0.25 \leq t_d/t \leq 1.75 \\ K_{b_d} &= 0.012b_d/b + 1.053 \text{ for } 0.125 \leq b_d/b \leq 0.5 \\ &= 0.039b_d/b + 1.084 \text{ for } 0.5 \leq b_d/b \leq 0.875 \\ K_{a_d} &= 0.027a_d/a + 1.049 \text{ for } 0.125 \leq a_d/a \leq 0.5 \\ &= 0.255a_d/a + 0.930 \text{ for } 0.5 \leq a_d/a \leq 0.875 \end{aligned}$$

K_{t_c} , K_{t_d} , K_{b_d} 와 K_{a_d} 은 각각 단일 판부재에서의 부식된 판 두께, 이중판 두께, 이중판 폭과 이중판 길이의 변화에 따른 영향을 고려기 위해 단일 등가평판 두께에 곱해지는 무차원화 된 수정계수이다. 이 수정계수들이 파라메트릭 구조수치해석으로부터 산출된 결과에 근거하여 얻어진 영향계수이다. 이 도출식의 타당성을 나타내기 위해 수치해석의 결과와 근사식 간의 근사 관계는 Fig. 4에 제시한 바와 같다. 본 그림에서 (a)부터 (d)까지의 수식의 공분산은 각각 1.35×10^{-6} , 1.13×10^{-6} , 1.59×10^{-6} , 5.82×10^{-6} 이다. 식 (9)를 이용하면, 엄밀 구조해석에 필요한 초기설계치수로 사용키 위한 등가평판 두께를 제공하는데 유용할 것으로 보인다.

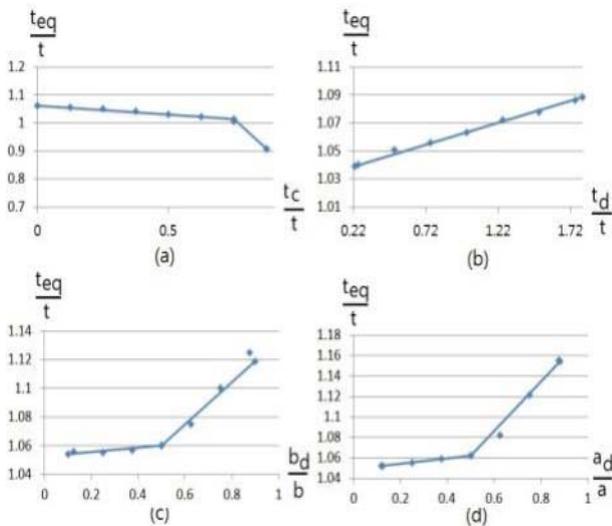


Fig. 4 Various equations of the equivalent flat plate thickness according to the variation of each design parameter of the doubler plate

4. 면내 전단력 및 양축압축력을 고려한 이중판 보강 판부재 설계시스템

4.1 판부재 설계시스템 정식화

본 연구에서 설계시스템 개발을 위해 GRG(Generalized reduced gradient) 알고리즘 (Lasdon & Waren, 1978)을 이용하였으며 최적화를 위한 기본 정식화의 내용을 짧게 소개한다. 최적화에 대한 기본적 정식화는 목적함수로서의 $f(X)$ 는 이중판 보강을 위한 단일 판부재만의 체적으로 취했으므로 간단한 1차 변수인 식 (5)의 세 변수, 즉 판의 길이, 폭 및 두께의 곱의 형태이다. 설계변수는 상기 세변수이며 마지막으로 제약조건은 좌굴 설계식 형태의 식 (6)으로 복잡하지만 유일한 제약조건으로 이를 만족하면서 면내 양축압축력과 전단력을 받는 최적 이중판구조 치수가 도출된다.

$$f_p(X) = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \tag{5}$$

$$g(X) = \left\{ \frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{R_{sx} \cdot \sigma_{xcr}} \right\}^{\alpha_1} + \left\{ \frac{\sigma_y + \sigma_{rey}}{R_{sy} \cdot \sigma_{ycr}} \right\}^{\alpha_2} - \eta_a \leq 0 \tag{6}$$

여기서,

- η_a : 단일 판부재의 좌굴 안전계수(기본적으로 1.0 취함)
- σ_x, σ_y : 각각 판 길이와 폭 방향의 압축응력(인장 시 0 취함)
- $\sigma_{xcr}, \sigma_{ycr}$: 각각 판 길이와 폭 방향으로 축압축에 대한 임계좌굴 응력으로 이는 소성수정인자에 의해 수정됨
- $\sigma_{rex}, \sigma_{rey}$: 각각 판 길이 및 폭 방향으로 작용하는 잔류응력
- R_{sx}, R_{sy} : 전단응력 관련 인자(α_3, α_4 변수로 포함)
- $\alpha_1 - \alpha_4$: 판부재의 가로 - 세로비(= a/b)와 폭 - 두께비 (= $b/t \sqrt{\sigma_0/E}$)에 따른 상수치

상기 판부재의 좌굴강도식은 각종 면내하중과 횡수압을 동시에 받는 하중경우에 대해 직사각판 형상의 하중-치짐 곡선의 거동분석으로부터 탄성 좌굴강도를 정의하고 유도되었다 (Paik, et al., 1992a).

$$\sigma_{xcr}^* = R_{qx} \cdot \sigma_{xcr} \tag{7}$$

여기서,

- σ_{xcr}^* : 횡압과 종방향 면내압축력이 동시에 작용할 때의 좌굴응력
- σ_{xcr} : 횡압이 작용하지 않을 때의 종방향 면내 임계압축좌굴응력
- R_{qx} : 판 종방향의 횡압 영향 관련 인자

$$= (1 + \alpha Q)^{1/2} \tag{8}$$

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

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

$$= 0.14$$

$$\text{for } 4 \leq a/b$$

$$Q = \frac{qb^4}{Et^4}$$

q : 횡하중(수압)

E : 탄성계수

t : 판의 두께

또한 탄소성 비선형 구조해석결과에 근거하여 개발된 판부재의 소성수정식인 아래식이 이용되었다 (Paik, et al., 1992b).

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= \sigma_E && \text{for } 0.5 > \sigma_E/\sigma_0 \\ &= \sigma_0 \left\{ -0.0874(\sigma_E/\sigma_0)^4 + 0.5857(\sigma_E/\sigma_0)^3 \right. \\ &\quad \left. - 1.5631(\sigma_E/\sigma_0)^2 + 2.0784(\sigma_E/\sigma_0) - 0.2165 \right\} && \text{for } 0.5 \leq \sigma_E/\sigma_0 \leq 1.9 \\ &= \sigma_0 && \text{for } 1.9 \leq \sigma_E/\sigma_0 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서,

σ_{cr} : 일축압축 작용시의 임계좌굴응력(판 길이방향 경우 σ_{xcr})

σ_E : 일축압축 작용시의 탄성좌굴응력(판길이방향 경우 σ_{xE})

σ_0 : 항복응력

4.2 강도 검토 및 설계 변경 모듈

앞서 서술된 내용을 근거로 단일 판부재의 강도 및 최적 설계를 손쉽게 추정하는 시스템을 개인용 컴퓨터의 일반적인 윈도우 환경 하에서 비주얼 프로그래밍을 이용하여 단순 입력을 통해 설계 검토 및 판부재의 설계변경 치수를 용이하게 산출할 수 있는 설계 및 강도평가 시스템의 구축 (Ham & Kim, 1997)의 경험을 토대로 면내 전단력과 양축압축력의 경우에 대해 새롭게 개발한 구조설계시스템의 예를 Fig. 5에 나타내었다. 이 설계시스템의 상부는 면내전단력을 추가하여 총 16개의 기본 입력자료로 구성되며 좌측 9개는 치수입력과 하중관련 입력자료 그리고 우측은 동일 재료인 경우 값이 동일한 입력 자료들이 표시된다.

시스템 하부에 최적화 적용에 필수인 목적함수, 설계변수 그리고 제약조건의 항목들이 나열되었다. 여기서는 목적함수로 판부재의 체적, 설계변수로는 3변수 중 판두께만을 변수로 잡고 제약조건은 식 (6)을 준비하여 0 이하일 경우 제약조건이 만족되는 것으로 하였다. 본 시스템을 이용해 입력 제시된 항목들에 대한 설계 적합성의 근거나 설계초기에 최소 판부재두께를 도출해 주어 경쟁력 있는 선박 판부재설계나 설계 파라메트릭 연구에 좋은 지침이 도출될 수 있을 것으로 사료된다.

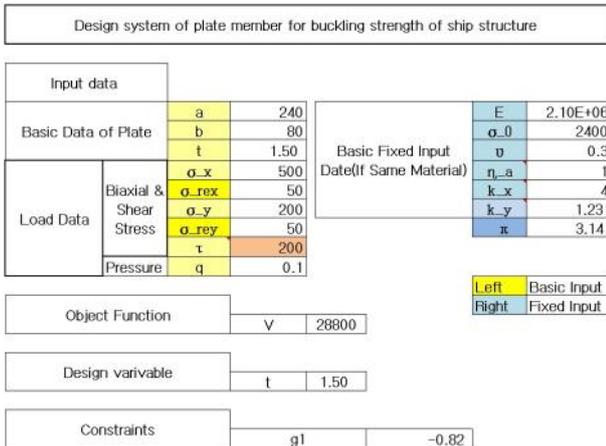


Fig. 5 Fundamental design system of plate member for buckling strength of ship structure

상기의 전통적인 최적구조설계시스템으로 구축된 목적함수, 설계변수 및 제약조건의 변동 상황과 상관관계를 설계자의 입장에서 일단 블랙박스 보고 구조설계자의 감각적 설계결정으로 직접 연관되기 어려운 면이 있다. 이에 따라, Fig. 6과 같이 강도 및 설계적합 여부의 판단을 위한 설계 검토화면을 최적화 설계시스템 하부에 준비하여 최적화 단계에서 각 점검 항목별 구조강도치와 설계치수 및 안전계수 등을 검토할 수 있는 설계점검과정을

제공해주어 보다 바람직한 설계와 검토의 원활한 흐름을 제공해주어 최적설계를 보다 쉽게 하고 구조설계자의 본연의 구조설계 감각을 근간으로 다양한 단계별 최적구조설계를 수행할 수 있는 하이브리드 설계시스템을 개발하였다. 본 연구에서 이용된 설계 및 강도검토용 설계검토화면을 자세히 보면 크게 3 단계로 구성된다. 먼저 첫 단계는 단일 판부재의 구조안전성 평가로서 제약조건으로 제공된 판부재 좌굴설계식의 적합설계 여부를 보여주기 위해, 전단하중을 포함한 양축방향 면내하중에 대한 안전계수와 총 하중에 대한 안전계수를 제공하고 있다. 두 번째 단계는 첫 기본적인 설계화면에 복잡한 좌굴설계식에 필요한 다양한 파라메타들을 항목별로 자세히 정리하여 현 설계 상태에서의 각 파라메타의 값들을 계산근거를 제공한다. 세 번째 단계는 설계된 단일 판부재의 특정영역이 손상 혹은 부식되었을 경우 그 영역에 걸쳐 특정두께(일반적으로 주판과 같은 두께)의 이중판 보강으로 복잡한 구조해석단계를 거치지 않고 기존 단일판부재 개념인 간이 등가두께를 도출해주어 이중판의 강도 건전성을 간이 평가해줄 수 있다.

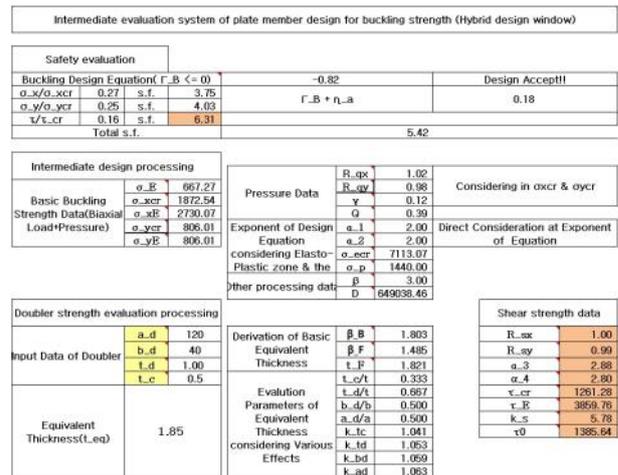


Fig. 6 Intermediate design system of the plate member for the buckling strength of ship structure(Hybrid design system window)

5. 선박 판부재의 설계 예

앞서 언급한 판부재 설계 시스템을 활용하여 바람직한 단일 판부재의 설계와 판부재의 부식 등의 손상에 따른 이중판보강의 한 예를 살펴보았으며 그 단계별 강도점검 및 이중판 설계의 수순에 따라 보다 상세히 그 설계 예를 본 장에서 살펴본다.

5.1 판부재 설계평가

먼저, Fig. 5와 같이 이중판 설계시스템에 초기 설정된 치수를 입력하면 그 입력된 판부재치수에 대한 강도상의 타당성 여부는 제약조건식 즉 좌굴설계식이 0이하이면 좌굴강도상 설계를 만족

한다는 뜻이다. 따라서 그 평가 예로 Fig. 7에서도 판길이 240 cm, 폭 80 cm 두께 1 cm로 주변의 네변이 모두 단순지지된 강 판부재에 평균잔류응력을 포함한 길이방향과 폭방향 압축 및 전단응력이 500 kgf/cm², 250 kgf/cm² 그리고 150 kgf/cm²의 하중이 작용하는 경우 제약조건이 -0.26을 제시해주어 0 이하의 값이면 만족되는 좌굴설계조건으로 좌굴강도에 큰 문제가 없음을 제시하였다. 또한 하이브리드 설계화면으로 Fig. 8의 상부 단계로부터 면내길이방향, 폭방향 및 전단하중에 대한 각각의 안전계수는 응력차원에서 2.91, 1.63과 7.37이 제시되고 총 안전계수는 1.36이 주어지면서 강도상 문제가 없는 적합설계임을 알려주고 있고 하부 단계에서는 좌굴강도평가에 흔히 사용되는 설계파라메타의 각종 정보들을 설계검토용으로 제시해주고 있다.

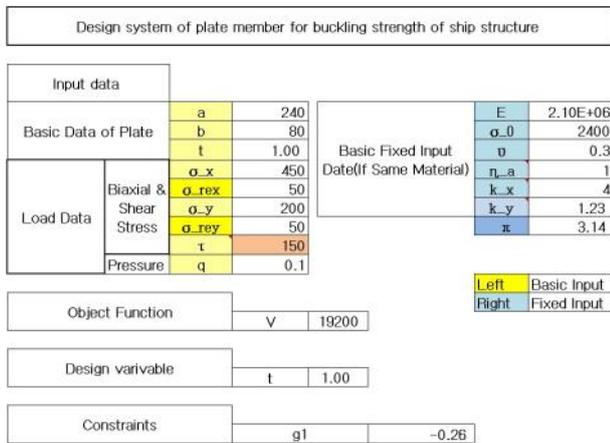


Fig. 7 Design example of design system of plate member for buckling strength of ship structure

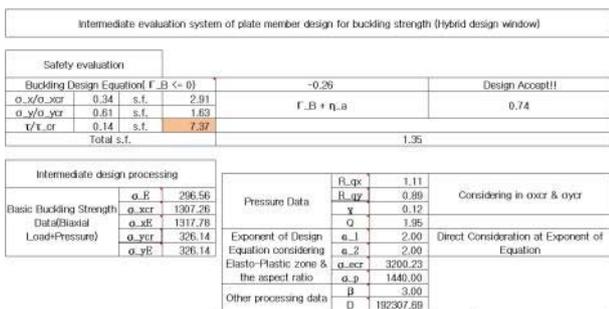


Fig. 8 Design example of upper part of hybrid design window

5.2 판부재 최적구조설계

앞서 설명한 초기단계 판부재설계에 근거한 기본 치수에 대해 좌굴평가의 문제가 나타나지 않으면 이를 그대로 최종 설계에 반영하면 되나 본 절에서는 부재 체적 혹은 두께 감소 등 재료절감 등을 목적으로 한 구조최적설계의 필요성이 요구되는 경우에 좌굴강도식인 제약조건을 만족시키면서 판두께를 절감하는 구조최

적설계를 수행하고 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 그 결과 예에서 초기판두께가 1.00에서 최적탐색을 통해 두께 0.94로 두께 감소가 이루어졌으며 이는 판부재 좌굴설계식 즉 제약조건이 0으로 된 결과를 주고 있다. 또한 하이브리드 평가화면인 Fig. 10의 상부 단계에서는 면내길이, 폭방향 및 전단응력차원에서 안전계수가 2.65, 1.38과 7.12를 보이고 총 안전계수는 1.00를 제시하면서 판부재 강도 차원에서 적절한 설계임을 보여주고 있고 하부 단계에서는 4장에서 언급된 판부재 좌굴평가에 적용되는 다양한 설계파라메타의 많은 항목들을 설계자들의 판부재 설계력 향상과 설계 계산과정의 참고자료를 위해 제공해주고 있다.

5.3 이중판보강 판부재의 강도 검토

최종 단계로 앞절의 최적판부재치수를 이용한 상태에서 오랜 판부재 사용으로 판부재 중앙부 120 cm × 40 cm 영역의 평균 두께 0.5 cm의 부식으로 두께감소가 발생하였다고 가정한다.

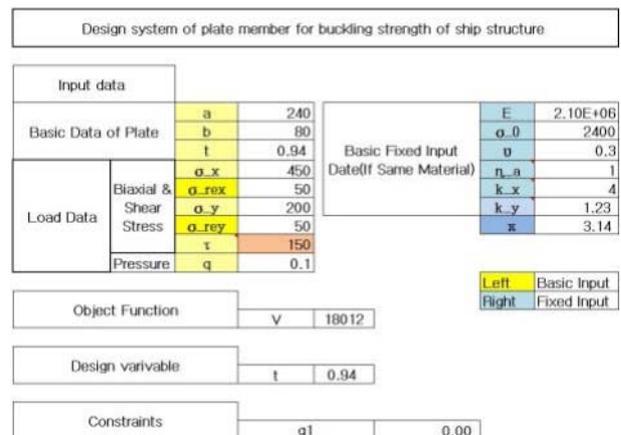


Fig. 9 Optimal design example of design system of plate member for buckling strength of ship structure

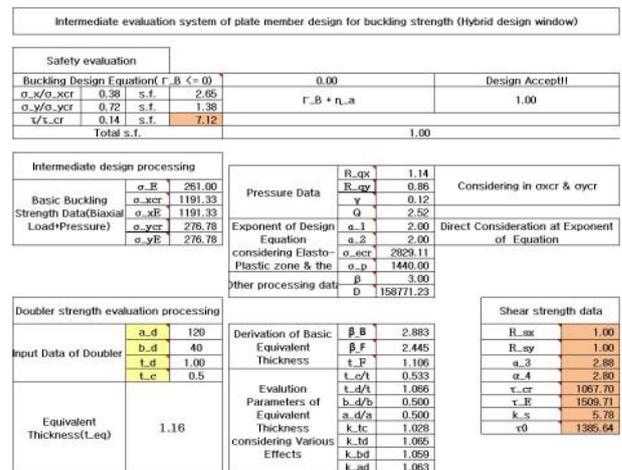


Fig. 10 Optimal design example of hybrid design window

이러한 경우 판부재의 보강이 필요하게 되는데 수리를 위해 엔진룸을 들어내고 블록전체를 교체하는 등의 대규모 수리는 지양하고 간편하게 이중판 보강법을 사용할 경우 이 직사각 0.5 cm의 주판부식영역에 두께 1 cm의 이중판보강의 경우에는 설계 시스템에 이중판과 관련하여 길이 120 cm, 폭 80 cm, 판두께 1 cm 및 주판의 평균부식두께 0.5 cm의 4가지 입력으로 판부재만의 등가두께가 1.16 cm에 달함을 Fig. 10 좌측 하부에 제공해 주며 동시에 4장에 언급된 이중판 보강과 관련한 설계파라미터 근거 자료가 그 우측에 제시되었다. Fig. 10의 강도검토 단계에서 최소두께 0.94 cm 이상으로 강도상의 안전성이 확보됨을 간편한 방법으로 확인할 수 있어 선박판부재의 부식에 따른 이중판 보강의 검토에 유용한 초기설계 가이드로 이용될 수 있다고 사료된다.

6. 결론

선박 판부재는 면내 및 면외력 등 많은 하중들을 받을 수 있으나 본 연구에서는 설계시스템의 프로토 형태를 구축하는 차원에서 비교적 복잡한 면내하중의 경우인 면내 전단력과 양축 압축력을 동시에 받는 경우에 대한 선박 이중판 설계시스템을 구축하였다.

- (1) 대상 판부재의 선정은 전형적인 선박 판부재로 이중판 구조의 가로세로비와 세장비를 각각 3과 약 2.7을 기준으로 하고 단일 판부재의 중앙부가 부식되거나 다양한 사유로 강도가 취약해진 직사각형 영역에 주판과 같은 두께인 판부재로 판부재면적의 25%인 직사각형태의 이중판이 판부재 중앙에 부착되는 형식을 보강의 기준으로 삼았고 면내 전단력과 양축압축력이 주요 하중인 경우를 대상으로 하였다.
- (2) 이중판보강 판부재설계는 기 개발한 면내 양축압축력과 전단력 외에 횡압등을 동시에 고려할 수 있고 소성수정이 가미된 판부재 좌굴설계식을 이용하였고 이중판 강도와 등가로 볼 수 있는 등가평판두께를 이용하여 세장비와 판부재 강도와의 선형적 상관관계를 이용하여 이중판 구조와 같은 강도를 유지할 수 있는 등가평판두께식을 개발하였으며 이 상관관계로부터 이중판구조에 근사하는 등가평판두께식을 시스템구축에 활용하였다.
- (3) 부식되거나 다양한 사유로 평균적으로 감소된 판두께, 이중판 두께, 이중판 폭 그리고 이중판 길이의 변화에 따른 영향은 무차원 영향계수 (K_{l_c} , K_{l_d} , K_{b_d} 그리고 K_{a_d})를 사용하여 이들 4가지의 변화영향을 고려한 등가평판식이 도출될 수 있게 등가두께 설계식을 제시하였다.
- (4) 앞선 내용들을 근거로 면내 전단력과 양축압축력 하의 판부재 구조설계 최적화를 구축하였다. 그리고 설계자의 용이한 설계판단을 위해 그리고 각 강도검토 단계별로 구조 설계치와 최소 설계치 및 안전계수 등을 설계과정에서 자동 제공받

아 바람직한 설계방향으로 최적화 수행을 도와주고 구조설계자가 설계적 감각을 유지하고 설계능력을 향상시키며 단계별 최적판부재설계를 수행할 수 있게 설계지원시스템 화면을 추가시킨 하이브리드 개념의 구조설계시스템을 구축하였다.

- (5) 본 개발시스템으로 선박 판부재에 대한 표준적인 설계의 한 예를 설명하였고 개발된 판부재 최적화설계단계와 하이브리드 설계시스템을 적극 이용하면 보다 손쉬운 이중판 초기설계 지침에 좋은 도구가 될 것으로 생각된다.
- (6) 이중판보강 판부재의 연구 결과에 대한 추가 연구 작업 측면내 인정하중을 포함한 횡하중 등 각종 복합하중 뿐만 아니라 이중판 자체의 설계변수들의 증가 등의 추가적 영향 검토를 통해 사용의 효용성을 보다 향상시킨 후 본 시스템을 통한 이중판 설계법들의 상호 비교 제시는 독립적 논문으로 상세히 제시할 예정이다.

후 기

이 연구는 2017학년도(논문발행일 기준) 한라대학교 교비 학술연구비(자율형) 지원에 의해 연구되었기에 이에 대한 관계자 분들께 감사드립니다.

References

- Ham, J.H., 1999. Strength evaluation of doubler plate of ship structure subjected to the longitudinal in-plane compression. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting, the Society of Naval Architects of Korea*, Daejeon, Republic of Korea, 11-12 November 1999.
- Ham, J.H., 2001. Strength evaluation of a doubler plate of ship structure subjected to the biaxial in-plane compression. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(1), pp.72-85.
- Ham, J.H. & Kim, U.N., 1997. The development of advanced buckling strength estimation system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(3), pp.53-60.
- Ham, J.H., 2014. Development of slender doubler plate hybrid design system for ship structure subjected to longitudinal in-plane compression. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(1), pp.20-27.
- Ham, J.H., 2016. Development of ship plate member design system reinforced by doubler plate subjected to biaxial in-plane compressive load. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(4), pp.294-302.

Jastrzebski, T. & Kimiecik, M., 1986. Statistical investigations of the deformations of ship plates (in France). *Bulletin de l'Association Technique Maritime et Aeronautique*, 86, pp.235-345.

Lasdon, L.S. & Waren, A.D., 1978. *Generalized reduced gradient software for linearly and nonlinearly constrained problems*. in : Greenberg, H.J. (Ed.) *Design and implementation of optimization software*. Sijthoff and Noordhoff: holland.

Paik, J.K. Ham, J.H. & Kim, U.N., 1992a. A new plate buckling design formula. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 171, pp.559-566.

Paik, J.K. Ham, J.H. & Ko, J.Y., 1992b. A new plate buckling design formula(2nd Report) - On the plasticity correction. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 172, pp.417-425.



함주혁