

각종 면내 및 면외 하중을 받는 선박판부재의 이중판 설계시스템 구축

함주혁[†]
한라대학교 메카트로닉스공학과

Design System of Doubler Plate of Ship Plate Members under Various In-plane and Out-of-plane 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.

The doubler plate design system for the reinforcement of the ship plate members was developed considering various loads that subjected to the in-plane biaxial load, the in-plane shear load and out-of-plane load. The author summarized the accuracy of the development formula and equations through the equivalent plate thickness concept and finally introduced the new design system of doubler plate reinforcement. Through this study, it can be considered as an initial design guideline based on ship doubler plate reinforcement strength at areas without repeated load, or an initial structure analysis model for final structural design.

Keywords : Doubler plate design system(이중판 설계 시스템), Equivalent plate thickness(등가 판두께), In-plane and Out-of-plane loads(면내 및 면외하중), Structural strength(구조 강도), Optimal structural design(최적 구조 설계)

1. 서론

국부적 부식, 찌그러짐 등 다양한 원인에 따라 선박 판부재에 국부 손상이 발생할 수 있다. 이러한 선박 판부재의 강도 손실을 보완하기 위해 선박 판부재 상부에 직사각형 형태의 이중판을 덧붙이는 이중판 보강법은 수리조선소에서 쉽게 적용할 수 있는 간편한 강도 확보 방법이다. 하지만 이중판 보강법이 일반적으로 강도 상 취약한 면이 있어 사용을 규제하는 선급규정(KR, 1999)으로 인하여 선체 종강도에 따른 반복하중이 상대적으로 약한 기관실 하부 내저판의 국부적 찌그러짐 등의 손상도 인근 부재 블록과 함께 크레인 탑재를 통해 새 블록으로 교체되고 그 후 엔진을 재 탑재하는 엄청난 공수가 요구되고 있다.

한편 기관실 하부 내저판의 국부적 찌그러짐 정도는 이중판으로 보강해도 큰 문제는 없을 것으로 사료되어 연구 자료들을 검토하였으나 이에 관련된 초기 설계자료조차 없어 관련 연구를 시작하게 되었고 이들 연구가 이중판 보강법의 초기 적용 시도에 조그만 단초라도 되었으면 하는 의미에서 연구를 시작

하게 되었다.

최근 학술적 동향은 이중판보강과 관련된 연구 자료는 저자의 연구 실적 외에는 파악하기 힘들어 인용하지 못하였으나 구조강도 검토차원에서 저자가 개발한 이중판 보강법에 관한 단계적 연구를 소개하면 단일 면내압축방향 관련 연구(Ham, 2014) 혹은 양축 면내압축하중 등 축방향 면내압축하중 관련 연구(Ham, 2016) 및 면내전단력을 포함한 연구(Ham, 2017) 등이 있다. 본 연구에서는 이들 개발내용을 함께 간략히 정리하고 다양한 면내 및 면외 하중들에 대해 이중판 보강이 보다 간편하면서 편리하게 사용될 수 있게 통합 구축한 설계시스템과 그 활용 예를 제시하였다.

2. 선박 판부재 선정 개요

본 연구에서 다루는 판부재는 우선 대형조선소에서 실적이 제일 많은 산적화물선 내저판의 종 및 횡 보강재의 각각의 한 보강재 간격의 범위에 있는 선박 판부재에 부착되는 이중판 보강설계에 한정한다. 따라서 선박 판부재에서 가로세로비와 세장비가

각각 3과 약 2.7인 대표적인 값을 판부재의 기본모델(Ham, 1999)로 선정한 바 있다.

이중판으로 보강된 선박 판구조부재를 Fig. 1에 나타내었다. 직사각형 형태의 주판(main plate) 바로 위에 이중판이 부착되면서 그 사각형의 주변이 용접 부착의 이중판 형태로 보강된다. 직사각형 주판의 길이와 폭은 각각 a 라는 늑판간격(floor space)과 b 라는 종방향 보강재의 간격(Longi. space)이다. 직사각형 이중판의 길이와 폭은 각각 a_d 와 b_d 이다. a_d/a , b_d/b 그리고 t_d/t 는 주판에 대한 이중판 각각의 길이, 폭 그리고 두께에 대한 비이다. 나머지 t_c/t 는 주판 두께와 이중판의 부식두께의 비이다. 판부재의 정중앙부에 1/4 직사각형 면적의 이중판이 보강용으로 놓인 이중판 판부재를 기본으로 이중판 길이(a_d), 폭(b_d), 두께(t_d) 그리고 주판의 부식두께(t_c)이다.

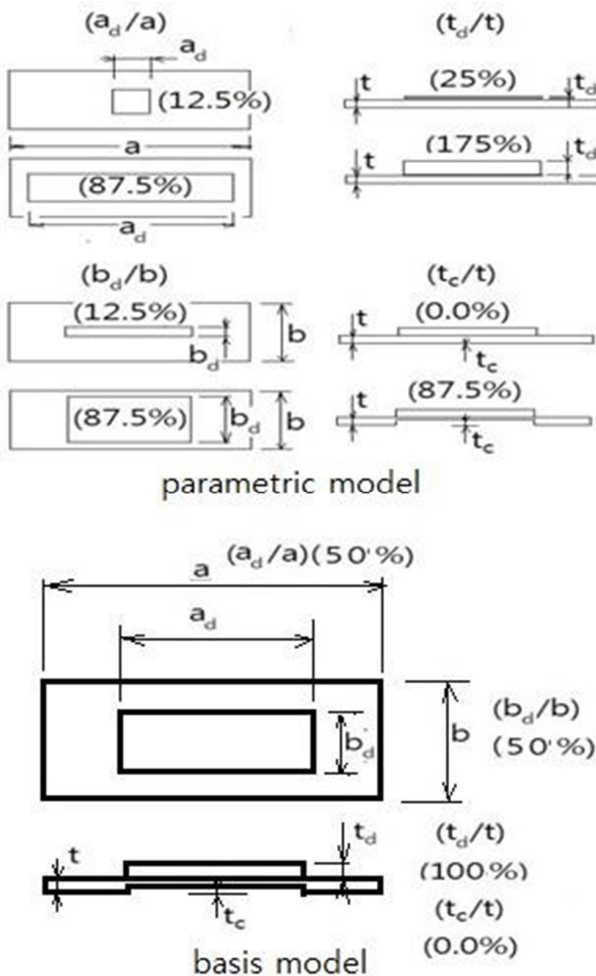


Fig. 1 Various arrangements of reinforced doubler plates

3. 등가두께 개념의 간이식 도출

상기의 각종 이중판 보강의 형식에 따른 좌굴강도 변화의 영향을 파악하기 위해 우선 표준 이중판 판부재를 저자가 개발한 좌굴평가식을 이용하여 이중판이 없는 평판의 등가두께로 환산

을 시도한 바가 있다(Ham, 1999; 2001).

Fig. 2는 기준이 되는 이중판으로 보강된 판부재 중에서 기준이 되는 판부재와 같은 두께로 판면적의 1/4인 이중판으로 보강된 표준 형상의 이중판 보강 판부재의 강도와 등가인 등가 평판부재의 상관관계를 각 하중조건에 따라 정리한 상관관계도이다. 종축은 구조해석을 통한 무차원 이중판부재의 강도이며 횡축은 이중판보강 판부재와 관련된 2가지 세장비로 이중판 등가평판부재의 세장비와 평판부재의 세장비이다. Fig.2 그림에서 (a)부터 (d)까지는 판부재의 강도에 미치는 모든 주요하중의 성분인 면내 일축압축하중, 면내 양축압축하중, 면내 전단 하중 & 양축압축하중 마지막으로 면내하중과 면외하중에 대해 각 하중경우에 대한 것이다.

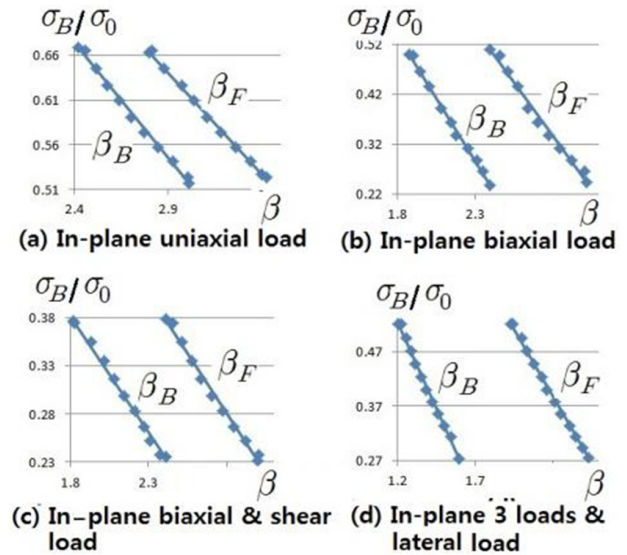


Fig. 2 Various correlation between equivalent plate and doubler reinforced plate

이들로 부터 거의 평행선 형태의 두 경사 직선의 패턴을 확인할 수 있어 이들 관계를 다음식과 같이 단순화 하였다.

$$\beta_F = \beta_B + k_1 + k_2 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_0} \right) \quad (1)$$

여기서, β_F : 등가평판부재의 세장비

β_B : 평판설계식의 세장비

σ_B : 이중판좌굴강도

σ_0 : 항복응력

그리고 k_1, k_2 는 각 4가지 하중조건에 따른 상수로 k_1 은 각 하중 경우 각각 -0.646, -0.704, -0.609 와 -0.933 이며 k_2 은 각 하중 경우 각각 0.420, 0.320, 0.077 그리고 7.679 이다. 이로부터 판부재가 결정되면 식(1)로부터 표준 이중판 보강판부재의 등가두께가 도출될 수 있다.

앞선 표준형 이중판 판부재의 세장비 영향을 고려한 식 개발에 추가하여 아래 연구에서는 표준 이중판부재에 판의 부식 등에 의한 판두께 감소의 영향, 이중판 두께변화의 영향, 이중판 폭과 길이 변화의 영향들을 K_{t_c} , K_{t_d} , K_{b_d} 그리고 K_{a_d} 라는 무차원 영향계수를 도입하여 식 (2)와 같이 면내하중과 면외하중을 받는 등가두께 산출식을 얻었다.

$$t_{eq} = K_{t_c} K_{t_d} K_{b_d} K_{a_d} t_F \quad (2)$$

여기서,

t_{eq} : 최종 이중판 등가평판 두께

t_F : 표준 이중판 등가평판 두께

면내 일축압축하중경우의 무차원 계수

$$K_{t_c} = -0.074 t_c/t + 1.03 \quad (0 \leq t_c/t \leq 0.875)$$

$$K_{t_d} = 0.03 t_d/t + 0.993 \quad (0.25 \leq t_d/t \leq 1.75)$$

$$K_{b_d} = 0.061 b_d/b + 0.997 \quad (0.125 \leq b_d/b \leq 0.875)$$

$$K_{a_d} = 1.68 a_d/a - 0.28 \quad (0.775 \leq a_d/a \leq 0.875)$$

$$= 1.022 \quad (0.125 \leq a_d/a \leq 0.775)$$

면내 양축압축하중 경우의 무차원 계수

$$K_{t_c} = -0.068 t_c/t + 1.11 \quad (0 \leq t_c/t \leq 0.875)$$

$$K_{t_d} = 0.0317 t_d/t + 1.085 \quad (0.25 \leq t_d/t \leq 1.75)$$

$$K_{b_d} = 0.039 b_d/b + 1.084 \quad (0.125 \leq b_d/b \leq 0.875)$$

$$K_{a_d} = 0.054 a_d/a + 1.075 \quad (0.125 \leq a_d/a \leq 0.75)$$

$$= 1.096 a_d/a + 0.296 \quad (0.75 \leq a_d/a \leq 0.875)$$

전단을 포함한 각종 면내하중에 대한 무차원계수

$$K_{t_c} = -0.064 t_c/t + 1.062 \quad (0 \leq t_c/t \leq 0.75)$$

$$= 0.654 a_d/a + 0.515 \quad (0.75 \leq t_c/t \leq 0.875)$$

$$K_{t_d} = 0.031 t_d/t + 1.032 \quad (0.25 \leq t_d/t \leq 1.75)$$

$$K_{b_d} = 0.012 b_d/b + 1.053 \quad (0.125 \leq b_d/b \leq 0.5)$$

$$= 0.039 b_d/b + 1.084 \quad (0.5 \leq b_d/b \leq 0.875)$$

$$K_{a_d} = 0.027 a_d/a + 1.049 \quad (0.125 \leq a_d/a \leq 0.5)$$

$$= 0.255 a_d/a + 0.930 \quad (0.5 \leq a_d/a \leq 0.875)$$

면내 조합하중과 횡압에 대한 무차원 계수

$$K_{t_c} = -0.060 t_c/t + 1.171 \quad (0 \leq t_c/t \leq 0.25)$$

$$= -0.339 t_c/t + 1.251 \quad (0.25 \leq t_c/t \leq 0.875)$$

$$K_{t_d} = 0.184 t_d/t + 1.031 \quad (0.25 \leq t_d/t \leq 0.75)$$

$$= 0.023 t_d/t + 1.142 \quad (0.75 \leq t_d/t \leq 1.75)$$

$$K_{b_d} = 0.221 b_d/b + 1.063 \quad (0.125 \leq b_d/b \leq 0.5)$$

$$= 0.048 b_d/b + 1.148 \quad (0.5 \leq b_d/b \leq 0.875)$$

$$K_{a_d} = 0.389 a_d/a + 0.969 \quad (0.125 \leq a_d/a \leq 0.625)$$

$$= 0.048 a_d/a + 1.186 \quad (0.625 \leq a_d/a \leq 0.875)$$

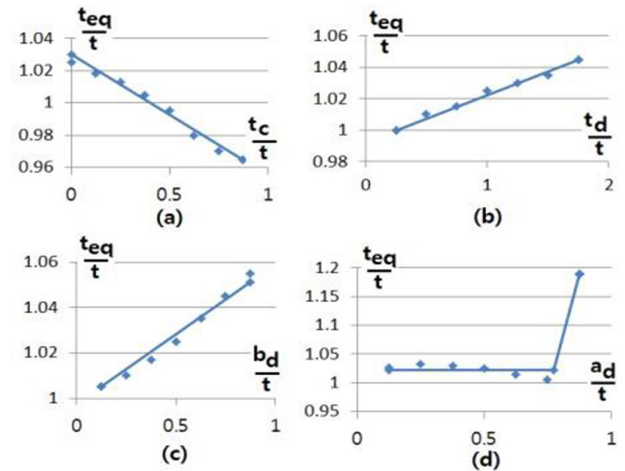


Fig. 3 Non dimensional influence coefficients in In-plane uni-axial load case

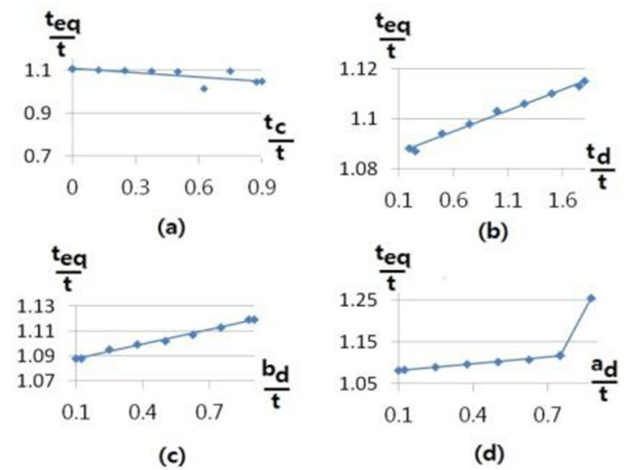


Fig. 4 Non dimensional influence coefficients in in-plane bi-axial load cases

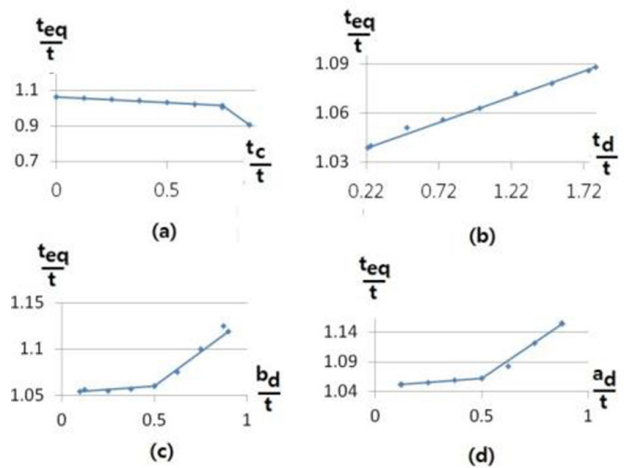


Fig. 5 Non dimensional influence coefficients in in-plane shear and bi-axial load cases

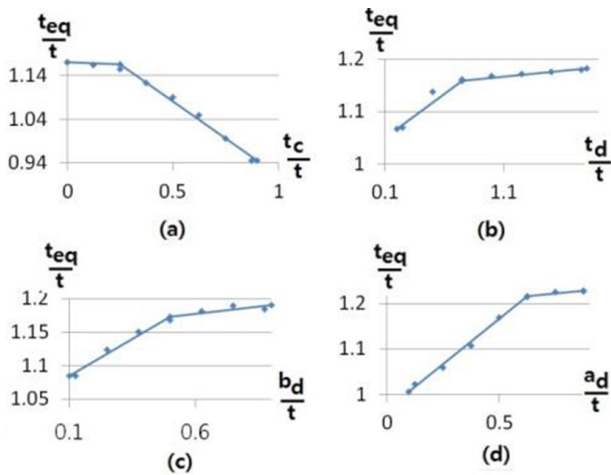


Fig. 6 Non dimensional influence coefficients in in-plane and out-of-plane load cases

이 도출한 식은 가능한 간편성을 위해 직선 내지 최대 두 직선 (bi-linear)의 형태로 표시하였다. 수치해석과 근사식 간의 상관관계(Ham, 2014; 2016; 2017)를 Fig. 3에서 Fig. 6까지 제시하였다. Fig. 3는 면내 일축압축하중, Fig. 4는 면내 양축압축하중, Fig. 5는 면내 전단하중과 양축압축하중 그리고 Fig. 6는 면내하중과 면외하중에 대한 것이다. 이로서 이중판 보강용 초기설계치수로 제공하기에 비교적 적합성이 있음을 보여주고 있다.

4. 이중판 보강 판부재 설계시스템

4.1 정식화 개요

이상의 판부재 보강용 이중판 설계시스템 개발을 위해 적용한 최적화 기법은 GRG(Generalized reduced gradient) 알고리즘(Lasdon & Waren, 1978)로 판부재 설계의 정식화에 활용하였다. 목적함수 $f_p(X)$ 는 이중판 보강을 위한 판부재의 체적으로 잡았으므로 식 (3)에서와 같이 설계변수는 판의 길이 (X_1)와 폭(X_2) 그리고 두께(X_3)이다. 마지막으로 제약조건은 식 (4) 형태의 복잡하지만 간단히 표기한 판부재의 좌굴평가식으로 이들 정식화를 통해 이중판이 부착될 선박판부재에 대한 다양한 면내 및 면외하중을 받는 최적 판부재의 치수가 도출된다.

$$f_p(X) = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3)$$

$$g(X) = \left\{ \frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{R_{sx} \times \sigma_{xcr}} \right\}^{\alpha_1} + \left\{ \frac{\sigma_y + \sigma_{rey}}{R_{sy} \times \sigma_{ycr}} \right\}^{\alpha_2} - \eta_a \leq 0 \quad (4)$$

여기서,

η_a : 좌굴 안전계수(기본적으로 1.0 취함)

σ_x, σ_y : 각각 종 및 횡방향 면내압축응력

$\sigma_{xcr}, \sigma_{ycr}$: 각각 종 및 횡방향 면내축압축에 대한 소성수정 이 고려된 임계좌굴응력

$\sigma_{rex}, \sigma_{rey}$: 각각 종 및 횡방향 면내잔류응력

R_{sx}, R_{sy} : 면내전단응력 인자(α_3, α_4 포함)

$\alpha_1 - \alpha_4$: 판부재 가로세로비(= a/b)와 세장비 (= $b/t \sqrt{\sigma_0/E}$) 관련 상수

이상의 판부재 좌굴강도식은 각종 면내 및 면외하중 하에서 하중-처짐 곡선의 거동분석으로부터 탄성 좌굴강도를 정의하고 유도되었고 소성수정이 적용되었다(Paik, et al., 1992a; 1992b).

앞 절에서 소개한 식(2)는 이중판 등가두께(t_{eq})를 산출하는데 사용된다. 이를 위해 식(3)과 식(4)는 평판부재를 초기 설계할 경우에 사용되거나 이중판 부착 판부재의 수치해석을 통한 이중판의 강도(σ_B)값에서 평판 설계식을 통한 세장비(β_B)를 구할 때 사용된다. 이 평판 설계식 세장비(β_B)가 구해지면 식(1)로 부터 등가평판부재의 세장비(β_F)가 도출된다. 따라서 등가평판부재의 세장비(β_F)에 대응하는 등가 평판두께(t_F)를 구하면 이중판 보강과 관련된 무차원 영향계수들이 곱하여져 최종적인 식(2)의 이중판 등가두께(t_{eq})가 얻어진다.

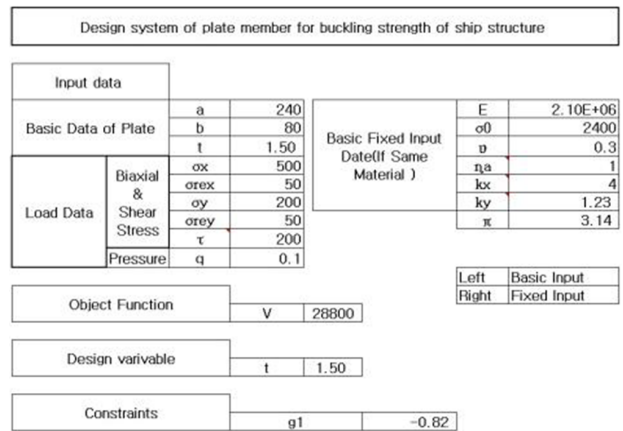


Fig. 7 Design system of ship plate member

4.2 판부재 설계 및 이중판 보강설계 모듈

예전의 강도평가 혹은 설계시스템 구축의 실적(Ham & Kim, 1997)을 기초로 하여 앞서 설명한 이론들을 근거로 개발된 단일 판부재 설계시스템의 개요는 Fig. 7과 같다. 상부의 좌우에 16개의 입력 자료가 준비된다. 그 하부에는 최적화 작업에 필요한 선박 판부재 설계를 위한 목적함수, 설계변수 그리고 제약 조건의 항목들 입력자료에 근거하여 자동으로 제시된다.

상기의 Fig. 7의 판부재 평가를 위한 표제화면에서의 기본 입력 입력자료와 최적 설계관련 목적함수, 설계변수와 제약조건들을 일목요연하게 제시해주는 반면 Fig. 8에서는 크게 상중 하 3단계의 화면으로 구성된다.

먼저 상부와 중간화면은 앞선 판부재설계 단계에서 초기 입력되거나 최적화되거나 설계자에 의해 수정된 치수에 대한 선택판부재의 강도 검토화면을 제시한다. 먼저 상부에서는 각종 하중성분이나 전체 하중에 대한 각각의 안전계수들을 자동 계산하여 제시 해준다.

중양부는 복잡한 평가식에서 사용된 각종 설계 파라메타들을 가능한 빠지지 않게 정리 제시하여 계산의 근거 및 설계자의 설계참고자료가 될 수 있게 하였다. 마지막으로 하단부는 이중판 보강설계 단계로 하단부 좌측 상부는 보강된 이중판 관련 4가지 입력자료가 추가되면 바로 아래에 등가 단일판 두께로 이중판 보강판부재의 강도를 제시해주어 이중판의 강도 건전성을 손쉽게 파악할 수 있다. 하부 중앙은 제시된 등가 단일판 두께와 관련된 모든 설계파라메타를 제시하여 설계자의 판단에 도움이 될 수 있게 하였다.

마지막으로 본 개발 시스템을 통해 구축된 많은 설계 예를 제시할 수 있으나 본 연구에서는 간략히 표준 판부재 가로세로비에 대한 각 4가지 조합하중 별 주어진 설계하중에 대한 판부재를 12가지로 국한하여 설계하고 이 설계된 판 부재에 이중판이 보강 되었을 경우 대한 등가 판두께 치수를 제공한 설계 예를 Table 1에 나타내었다. 일축 면내하중의 경우는 이중판의 길이변화, 양축 면내하중의 경우는 이중판 폭의 변화, 전단력을

포함한 면내 조합하중의 경우는 이중판 두께 변화 그리고 마지막으로 면내 및 면외 하중의 경우는 부식두께의 변화를 주면서 설계된 등가 판두께를 제시한다. 각 파라메타 변화에 따른 등가 판두께의 변화에 이해가 부족한 경우 Fig. 3부터 Fig. 6까지의 무차원 영향계수 설계선도를 참조하면 이해에 도움이 되며 마지막 하중의 경우는 압력하중의 효과가 면내하중들의 좌굴 발생을 어렵게 하여 판의 강성을 증가시켜 상대적으로 두꺼운 등가두께를 제시해준다. 추후 설계 경우의 수를 조합하면 수백에서 수천 이상의 설계자료를 만들 수 있고 이들을 체계적으로 정리하고 혹시 부족한 점이 발견되면 수정보완을 통해 개선하고 정리된 것들이 이중판 보강을 위한 바람직한 초기설계자료가 되었으면 한다.

5. 결론

선택 판부재로 인장, 압축 및 전단 등의 다양한 면내하중뿐만 아니라 수압 등의 면외하중을 받는 경우도 고려한 복합하중에 대한 이중판 보강이 가능한 판부재 설계시스템을 개발하였다.

- (1) 판부재는 전형적 선택 판부재가 될 수 있게 가로세로비 3과 세장비 약 2.7을 표준 선택판부재로 삼아 부식 혹은 강도 취약부에 직사각 이중판부재를 주판의 1/4면적의 이중판이 판부재 중앙에 보강되는 형식의 구조를 기준 이중판 보강 판부재로 하였다.
- (2) 이중판 보강 판부재의 강도와 같은 등가평판두께 개념을 도입하여 이중판 보강 판부재와 강도를 같은 수준으로 유지할 수 있는 등가평판 및 평판부재의 세장비와의 상관관계를 파악하여 보강이 필요한 판부재가 결정되면 이중판 보강판부재의 기준 등가 판두께가 도출될 수 있게 수식화 하였다.
- (3) 직사각 이중판의 3가지 치수인 두께, 폭과 길이의 각각의 변화와 주판의 부식두께의 변화 총 4가지 영향을 고려할 수 있는 무차원 영향계수를 도입하여 기준 등가 판두께 식에 도입하여 그 영향도 고려할 수 있게 하였다.
- (4) 설계자의 설계판단을 돕고 선택판구조 자체의 강도평가를 위해 구조 초기설계치와 최소 설계치 및 각각의 경우의 안전계수 등의 자료제공을 통해 설계과정에서 강도 점검 등 현재의 설계상황을 파악하면서 최적의 판부재 설계를 수행할 수 있는 설계시스템과 그 예를 제시하였다. 따라서 본 개발시스템을 통해 이중판 보강을 위한 초기구조설계에 좋은 도구가 되었으면 한다.

후 기

이 연구는 논문발행일 기준으로 2018학년도 한라대학교 자율형 학술연구비의 지원에 의해 연구되었기에 이에 관련한 관계자 여러분께 감사드립니다.

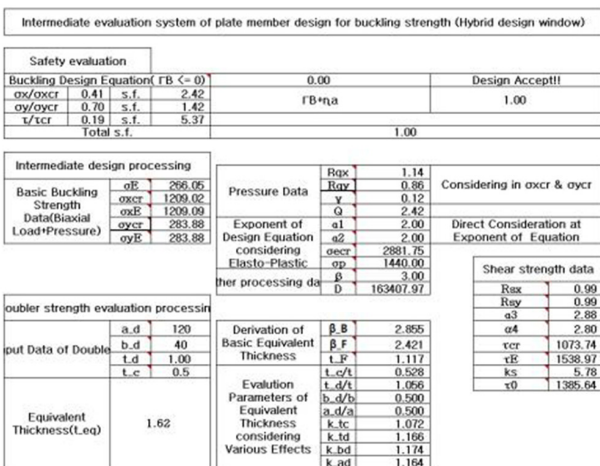


Fig. 8 Second window for plate strength and doubler design

Table 1 Design examples of doubler plate

Load case	(unit: cm or kgf/cm ²)											
	Main plate			Design load				Doubler plate				t _{eq}
	a	b	t	σ_x	σ_y	τ	q	a _d	b _d	t _d	t _c	
In-plane uniaxial	240	80	0.94	1200	0	0	0.1	60	40	0.94	0.00	1.04
	240	80	0.94	1200	0	0	0.1	120	40	0.94	0.00	1.04
	240	80	0.94	1200	0	0	0.1	180	40	0.94	0.00	1.04
In-plane biaxial	240	80	0.95	600	250	0	0.1	120	20	0.95	0.00	1.09
	240	80	0.95	600	250	0	0.1	120	40	0.95	0.00	1.10
	240	80	0.95	600	250	0	0.1	120	60	0.95	0.00	1.11
Biaxial & shear	240	80	1.00	500	250	150	0.1	120	40	0.5	0.00	1.25
	240	80	1.00	500	250	150	0.1	120	40	1	0.00	1.27
	240	80	1.00	500	250	150	0.1	120	40	1.5	0.00	1.29
Inplane & pressure	240	80	0.93	300	200	100	0.25	120	40	0.93	0.00	1.74
	240	80	0.93	300	200	100	0.25	120	40	0.93	0.35	1.67
	240	80	0.93	300	200	100	0.25	120	40	0.93	0.70	1.48

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. & 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., 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., 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.
- Ham, J.H., 2017. Development of doubler design system for ship plate members subjected to the in-plane shear and biaxial compressive loads. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), pp.242-249.
- Korea Register of Shipping (KR), 1999. Internal Regulation of KR Inspection, Regulation of Inspection 30211, 3-2-12(Rev. 32. 37)-3-2-19.
- 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.



함 주혁