

종방향 면내 압축하중을 받는 세장한 선박 이중판의 강도 해석

함주혁*

Strength Analysis of a Slender Doubler Plate of Ship Structure subjected to the Longitudinal In-plane Compression

Juh-Hyeok Ham*

요 약

세장한 선박 판부재를 대상으로 가장 중요한 하중인 종방향 면내하중을 작용시키면서 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate) 부식 영향 등의 각종 파라메타 영향에 따른 이중판의 정적 강도평가를 주판의 접촉효과를 고려한 탄소성 대변형 비선형 시리즈 구조해석을 수행하였으며 이들 해석 결과로부터 각 파라메타의 변화에 따른 강성과 강도 특성을 분석하였다.

또한 이중판의 보강 효과가 최소한 새판으로 치환 보수한 평판 강도 수준으로 설계되어야 하므로 이를 손쉽게 파악할 수 있게 이중판으로 보강된 판부재를 등가 평판 두께로 환산할 수 있는 간이 평가식을 개발하였다.

이 개발식을 이용하여 각 이중판 설계의 영향인자 변화에 따른 등가 평판두께의 증감 정도를 파악하고 이로부터 적어도 새판으로 보수한 평판강도에 달할 수 있게 길이방향 일축 면내 압축하중을 받는 세장한 이중판의 설계지침을 제시하였다.

마지막으로, 개발된 등가 평판 도출식은 고정밀 좌굴강도 평가식과 서로 일정한 상관관계가 있음을 확인하고 관계식을 정립하였다. 이 관계식을 각 경우별로 축적하여 앞으로 일일이 구조해석을 수행하지 않고도 설계된 이중판 강도를 등가 평판두께로 제시할 수 있는 간이 추정식의 개발에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

A study for the structural strength evaluation on the slender doubler plate has been performed through the systematic evaluation process.

In order to estimate the proper static strength of doubler plate subjected to the longitudinal in-plane compression, 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 their

접수일자: 2000년 5월 29일, 승인일자: 2000년 8월 28일

*정회원, 한라대학교 기계공학부 조선공학전공 조교수(E-mail: jhham@hit.halla.ac.kr)

results. Also, in order to compare the doubler structure with the original strength of main plate without doubler, a simple formula for the evaluation of the equivalent flat plate thickness is derived based on the additional series analysis of flat plate structure

Using this derived equation, the thickness change of a equivalent flat plate is analyzed according to the variation of various design parameters of doubler plate and some 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 by author et al. is discovered and these relations are formulated for the future development of simple strength evaluation formula of doubler plate structure.

1. 서 언

대양을 항해하는 중, 충돌, 좌초 및 부식 등의 이유로 선박 판부재의 강도가 약해지면 대부분의 경우 판을 제거하고 새판으로 대체하는 방법이 통용되는 수리법이며, 강도가 취약해진 판 위에 적당한 크기의 이중판(doubler)을 겹쳐서 보강하는 이중판 보강법은 여러 가지 강도상의 문제로 기피하거나 사용되지 않고 있는 실정으로, 실제 적용하기에도 여러 규정상에 많은 제약이 있어 손쉽고 간편한 보강법임에도 불구하고 소외되고 있는 실정이다(한국선급 1999).

이러한 이유로 새 판부재로 수리키 위해 엔진을 들어내는 등 많은 인건비와 비용이 발생되기도 한다.

한편 판부재의 강도나 강성을 다룬 논문은 유공판의 보강에 대해 임상전 등(1982), 장창두/나승수(1985) 및 Takeshi/Shinji(1978) 그리고 판부재의 강도 및 최종강도와 관련하여 Paik 등(1992), 김외현 등(1993)을 비롯한 많은 연구실적들이 있다. 최근에는 판부재의 좌굴강도 연구와 관련하여 정확도 및 여러 영향인자를 추가적으로 고려하면서(Paik 등 1992) 시스템화시켜 사용자의 효율성을 한층 높이고 있다(함주혁/김을년 1997).

그러나 이중판 나름대로의 장점을 살려서 수리에 직접 적용하기 위한 관련 연구 및 지침이 국내

외적으로 찾아보기 힘들다(Takeshi/Shinji 1978)(한국선급 1999).

본 연구에서는 선박의 대표적인 판부재를 대상으로 가장 기본적인 하중인 종방향 면내하중을 작용시키면서 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식 영향 등의 각종 파라메타 영향에 따른 이중판의 강도평가를 이중판의 접촉 효과를 고려한 탄소성 대변형 구조해석을 통해 분석하였다.

여기서 이중판 보강이 적어도 새판으로 치환 보수한 평판의 강도수준으로 설계되어야 하므로 이를 손쉽게 파악할 수 있게 이중판으로 보강된 판부재를 등가의 균일판 두께로 환산할 수 있는 간이식을 개발하였다.

이를 이용하여 각 영향인자의 변화에 따른 설계 두께의 증감 정도를 검토할 수 있는 설계 및 평가 지침 등을 제시하였다. 또한 좌굴평가식(Paik 등 1992)과 등가평판 도출식과의 상관성을 파악하고 관계식을 정립하였다.

이를 차후의 이중판 강도 추정식 개발에 이용할 계획이다.

2. 이중판 강도 해석

이중판의 강도평가는 고려해야하는 복잡한 많은 하중성분이 존재하나 일차적으로 판부재에 작용하

는 주요하중인 면내 종방향하중을 대상으로 이 하중의 증가에 따른 이중판의 하중-처짐 특성을 분석하여 보았고 그 상세를 항목별로 설명하였다.

2.1 이중판 구조의 가로세로비 및 세장비 선정

전형적인 선박 판부재를 선택하기 위해 많은 각 유형의 선박 구조자료가 필요하겠지만 이 항목만으로도 엄청난 자료취득 및 분류의 과정과 정리가 필요하다. 따라서 연구의 단순화를 위해 일차적 판부재 구조의 선정 작업으로 건조선의 자료가 비교적 체계적으로 많이 축적되어 있고 취득이 손쉬운 국내 조선소의 산적화물선의 늑판과 중보강재 치수를 대표적 구조로 간주하여 판부재의 가로세로비를 정하는데 이용하였다.

이 조사자료의 예를 Table 1에 제시하였다.

Table 1 Space of solid floor and longitudinal stiffener(unit: mm)

DWT	25K	37K	47K	60K	70K	138K
bottom longi.	785	800	800	910	765	900
space floor space	2400	2280	2400	2400	2520	2400

이로부터 판부재는 길이방향이 늑판간격(floor space) 그리고 판폭이 이중저 중늑골 간격(bottom longitudinal space)이므로 이를 일반 선박의 대표적인 가로세로비라고 가정하여 가로세로비가 3인 판부재 모델을 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 횡하중을 무시한 일축 면내하중만을 고려하므로 비교적 세장한 판을 대상으로(세장비가 약 2.7)기존 모델로 선정하였다. 후판 및 극심한 횡하중 등의 다양한 항목들에 대한 고려는 추후 연구에서 계속될 것이다.

2.2 이중판 구조 해석 모델링

- 요소크기

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. 이로부터 기본 모델은 이중판이 부착되지 않은 상태에서 가로세로비 3, 앞서 언급한 세장비 약 2.7을 유지하면서 판의 요소크기는 판폭의 1/16 판 길이의 1/48로 판요소를 사용하여 모델링하였다.

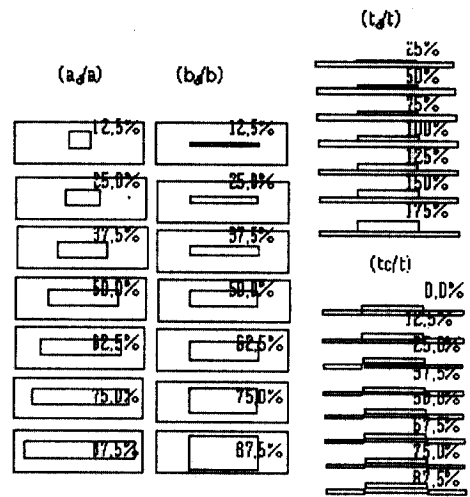


Fig. 1.1 Parametric variation of doubler plate structure

- 이중판 배치

판의 중앙부에 주판(main plate)과 같은 두께의 판으로 판 면적의 1/4인 이중판이 부착되는 형식을 본 연구의 기준으로 삼았으며 이중판 길이, 폭, 두께 및 주판 부식의 영향에 따라 모델링을 변경하였고 그 개요를 Fig. 1.1에 나타내었다.

상기 그림과 같이 주판길이에 대한 이중판 길이 ($\frac{a_d}{a}$)와 주판 폭에 대한 이중판 폭 ($\frac{b_d}{b}$)을

12.5%에서 87.5%까지 12.5% 간격으로 7단계로 변화시켰고, 주판두께에 대한 이중판 두께 ($\frac{t_c}{t}$)를 25%에서 175%까지 25% 간격으로 7단계, 그리고 주판두께에 대한 이중판 부식두께 ($\frac{t_c}{t}$)를 0%에서 87.5%까지 12.5% 간격으로 8단계로 변화시키면서 이중판 부착에 따른 각종 파라메타의 영향을 살펴보았다.

이중판과 주판의 간격을 확보하기 위해 이들 판 각각의 두께 중심에 이중판과 주판의 판요소를 설치하였다. 또한 이중판 주변 용접부는 이중판과 주판은 잘 용접되어 하중이 작용하는 상태에서 용접부의 분리가 발생하지 않는다는 가정 하에서 용접부 상세를 모델링하지 않고 판요소로 주판과 이중판을 판요소로 연결하여 모델링하였다.

- 모델영역

해석모델은 판의 길이방향 축하중이 작용하는 모델 및 하중이 대칭을 이루고 있어 많은 부분의 거동이 대칭적인 거동을 보일 것으로 보이거나 본 해석에서 다양한 이중판이 부착되고 주판(main plate)의 부식 등의 모델변경에 따른 판의 수직방향으로 발생하는 거동이 반파(half wave) 개수가 짝수가 되는 경우 대칭성을 어길 수 있어 판 전체 길이에 걸친 영역을 모델링 대상으로 잡았다. 판의 폭방향으로는 대칭성이 확보되므로 판부재의 반폭영역의 모델링이 가능하나 차후 추가적인 하중 고려를 위해, 즉 전단력 등의 비대칭적 거동에도 모델을 사용키 위해 전폭 모델을 사용하였다.

- 요소 및 절점수

앞서 언급한 총 29개의 이중판 모델을 구성하였고 여기서 이중판 구조의 기준 모델이 되는 이중판 면적이 주판면적의 1/4이 되는 한 모델을 대상으로 요소수와 절점수는 각각 와 1,472개와 1058개로 그 상세는 다음과 같다.

표준 모델의 총 요소수 : 1,472 개

- 판 요소 : 1,024 개

- gap 요소 : 192 개

- 보 요소 : 256 개

총 절점수 : 1,058 개

- 하중

판부재의 하중은, 가장 큰 주요 하중으로 볼 수 있는 선박의 종강도 하중인 판부재의 길이 방향 면내하중을 점진적으로 증가시키면서 하중-처짐 거동을 분석하였다.

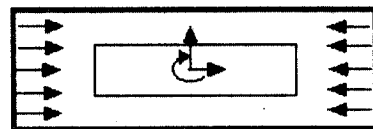
판 길이방향의 전 모델이 사용되어 일단을 고정하고 다른 단에 하중을 작용시키면 대칭적 처짐형태인 경우 주변의 강한 보의 강성과 일단고정간의 강성차이로 완벽한 대칭의 확보가 곤란할 것으로 판단되어 양쪽에 대칭적인 분포하중을 주어 대칭성을 확보하였다.

- 경계조건

판부재의 보강재가 설치되는 위치인 판의 주변 경계부가 직선을 유지시키기 위해 강한 보요소를 설치하였으며 판부재의 거동에 추가적 강성이 고려되지 않도록 비틀림강성과 단면적은 극소화시켰다.

대칭적 모델 및 하중이 작용하였으므로 판부재의 정중앙부의 한 절점에 강제이동이 발생하지 않게 하기 위해 면내 회전 및 판길이 및 폭방향의 이동을 제한하였다. 판 폭방향의 중앙부는 대칭조건을 부여할 수도 있으나 전단하중 등 다른 추가적 연구 항목들을 위해 전 폭을 사용하였다.

이와 관련된 예를 작용하중과 더불어 Fig. 1.2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 판부재 주변 4 단부는 판의 수직방향의 이동을 구속하였다.



simple supported edge

Fig. 1.2 Constraints at center point and boundary edges with axial in-plane load

- 해석프로그램

해석의 정통성을 위해 개인적으로 개발한 프로그램을 지양하고 범용 프로그램으로 잘 알려져 있고 저자가 많은 사용 경험이 있었던 MSC/NASTRAN의 개인용컴퓨터 버전인 MSCN4W-V4.0(1999)을 이용하였다.

- 비선형 풀이

비선형 해석은 앞선 요소크기 및 하중 증분 등과 함께 비선형 풀이의 타당성을 확보하기 위해 그 해가 잘 알려진 이중판이 없는 판부재의 하중-처짐 거동으로부터 그 정확도를 확인하였다. 이 과정에서 여러 풀이법 중 본 해석에서는 Newton-Rhaphson법을 일관성 있게 채택하게 되었다.

- 재료특성

판으로 이루어진 주판(main plate)와 이중판 모두 완전탄소성체로 가정하였다.

- 접촉부 이상화

이중판이 주판(main plate)과의 접촉효과는 갭요소를 사용하여 이상화시켰으며 본 모델에서는 이중판과 주판의 절점을 횡방향으로 일치시킨 상태에서의 갭요소를 설정하고 초기갭 열림은 없는 것으로 하였다.

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.

Fig. 2.1은 갭요소에 대한 축 응답의 일 예를 제시하였다. 압축에서는 높은 강성의 K_a 와 무시할 정도의 강성인 K_b 인 두 가지 강성을 가진다. 이들 강성의 판단은 갭요소의 특성치 입력 항목 중 U_0 라는 실수로 정의되는 초기 갭열림의 값에 좌우되어 결정된다. 갭요소의 물성치를 부여하는데 근접 갭강성은 인근 자유도에 대한 강성의 1000배를 넘지 않게 부여하였으며 갭요소 자체는

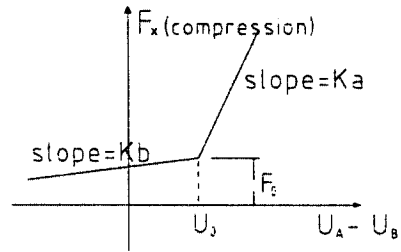


Fig. 2.1 Gap axial force vs. deflection

선형을 유지한다.

Penalty값인 K_a 는 풀이의 효율성 즉 numerical ill-condition, 수렴의 지연 그리고 발산 등의 방지를 위해서는 가능한 작게 값을 주어야 하나 풀이의 정확성 즉 실제 값에 가까운 풀이를 위해서는 너무 작은 값은 곤란하다. 이들 값은 갭요소 특성치 입력항목에서 준비되며 약한 강성에 의해 큰 변위로 발산하는 비선형 해를 야기시키지 않게 갭요소의 사용에 주의가 요구되며 이에 따라 본 해석에서는 K_b 의 default값은 K_a 강성의 10-8배 정도로 다음과 같은 관계를 이용하여 산정하였다(MacNeal-Schwendler 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 국부 강성

$K(db)$: 주판과 접촉하는 이중판의 절점 국부 강성

U_a : a점의 갭축방향 이동량

U_b : b점의 갭축방향 이동량

상기의 Penalty 값을 구하기 위하여 이중판과 주판의 접촉부에서 갭요소가 설치되는 위치에 단위하중을 작용시켜 강성을 구하였고 최대 및 최소 강성을 고려하여 각 접촉 절점들을 대표할 수 있는 Ka 값을 (2.1)식에 따라 산정하였다. 이들 주판과 이중판의 마찰력은 미소하다고 가정하여 무시하였다. 이중판과 주판사이에 설치한 갭요소의 개요를 Fig. 2.2에 나타내었다.

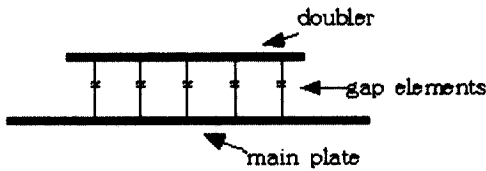


Fig. 2.2 Gap elements between main plate and doubler plate

3. 각종 파라메타의 영향 분석

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

3.1 주판(main plate) 부식의 영향

주판이 국부적으로 파손되거나 부식되어 이중판에 의해 보강된 경우로, 이중판으로 보강된 하부의 주판의 평균 부식두께를 부식되지 않은 경우 (0.0% 부식)부터 87.5% 부식까지 12.5%씩 총 8 단계로 구분하여 그 각각의 하중-처짐의 거동을 파악하여 보았고 그 결과를 좌상측의 Fig. 3.1에 제시하였다.

Fig. 3.1의 2차원 좌표에서 바닥의 가로축은 작용하중을 항복하중으로 무차원화시킨 값 ($\frac{\sigma}{\sigma_0}$) 으로 판부재의 면내 길이방향 하중의 크기를, 세로축은 판의 수직방향 최대 처짐을 판두께로 나누

어 무차원화 ($\frac{\delta_{max}}{t}$) 시켰으며 곡선들은주판의 부식된 두께를 새판 두께로 나누어 부식의 정도 ($\frac{t_c}{t}$)를 %로 나타내었다. 상기 그림으로부터 주판의 부식에 따라 점차적인 강도의 감소 경향을 확인할 수 있고 부식 증가에 따라 하중-처짐 곡선이 교차되지 않고 전반적인 하향 평행 특성 즉, 강성 및 강도의 감소 경향을 보이고 있음을 파악할 수 있다.

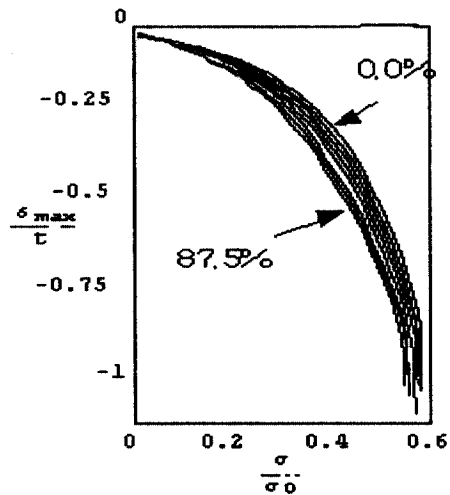


Fig. 3.1 Load-deflection curves according to the variation of main plate corrosion

3.2 이중판 두께의 영향

이중판 두께의 변화에 따른 강도, 강성의 변화를 살펴보기 위해 이중판의 두께를 주판(main plate)의 두께와 같은 경우를 기준으로 이중판을 주판의 중심에 위치시키고 곡선들을 주판두께에 대한 이중판 두께의 비($\frac{t_d}{t}$)를 변화시켜 해석하였는데 두께의 증가 및 감소를 포함하여 주판두께의 25%부터 175%까지 25% 간격으로 총 7단계로 구분하여 그 거동을 파악하였고 Fig.3.2에 이를 제시하였다. 좌표축은 앞선 부식 영향의 경우와 동일하다. 상기 그림으로부터 주판과 같은 두께인

기준 두께 보다 이중판 두께가 감소하는 경우 초기 편심량의 감소에 따라 초기 강성이 높은 값을 유지하다 급격히 강성이 하락되는 전형적 좌굴현상에 가까워지는 경향이 있으며 이중판 두께 증가에 따른 일반적인 강도의 증가가 확인된다.

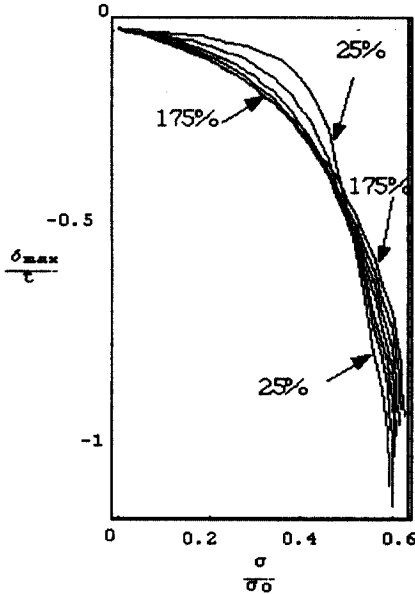


Fig. 3.2 Load-deflection curves according to the variation of doubler thickness

3.3 이중판 폭의 영향

이중판 폭의 변화에 따른 판부재의 강도 변화를 살펴보기 위해 이중판의 폭을 주판의 폭으로 나눈 값인 ($\frac{b_d}{b}$)를 이중판 폭이 주판의 반인 경우를 중심으로 총 7단계, 즉 판폭의 12.5%에서 87.5%까지 12.5%의 간격으로 구분하여 해석을 실시하였다. 이를 Fig. 3.3에 나타내었다.

본 그림으로부터 이중판 두께의 감소와 같이, 폭 감소에 따른 강성의 감소를 보이나 이에 따른 초기 편심의 구역의 축소로 초기강성이 상승하는 효과를 나타내고 있다.

3.4 이중판 길이의 영향

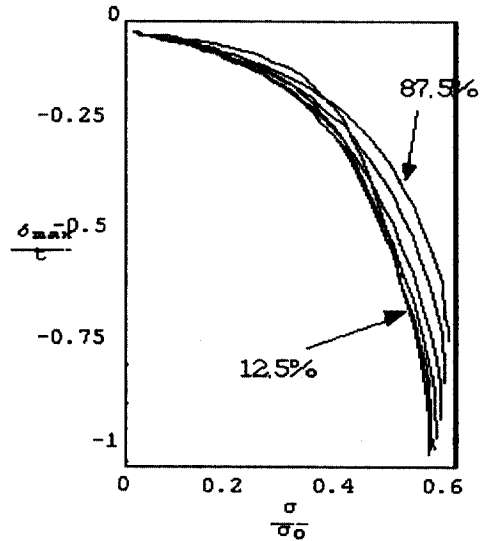


Fig. 3.3 Load-deflection curves according to the variation of doubler breadth

마지막으로 이중판 길이의 변화에 따른 판부재의 하중-처짐 거동을 살펴보기 위해 7단계의 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 3.4에 표시하였다. 이중판 길이/판부재길이를 표시하는, $\frac{a_d}{a}$ 를 판길이 12.5%부터 87.5%까지 12.5% 간격으로 총 7단계의 해석 결과를 나타내었다.

본 그림으로부터 길이 감소에 따른 강도의 비교적 미소한 감소를 보이며 초기 편심 영역, 즉 이중판 보강 영역의 축소에 따른 초기 강성의 효과는 폭, 두께 변화의 경우와 유사하다. 그러나 길이 증가에 따라 점차적인 강도의 상승과 마지막 단계인 87.5%의 이중판 길이에서는 급격한 강도의 증가를 보이는데 이는 이중판이 거의 판의 길이에 걸쳐 부착되어 강도가 상승하게 되며 급격한 횡방향의 처짐이 유발되지 않는다. 이 현상은 이중판으로 보강되지 않은 주판의 양단부 근처의 국부좌굴에서 발생되며 이 처짐거동이 대칭성을 보이므로 1/4모델을 이용하여 Fig. 3.5에 나타내었다.

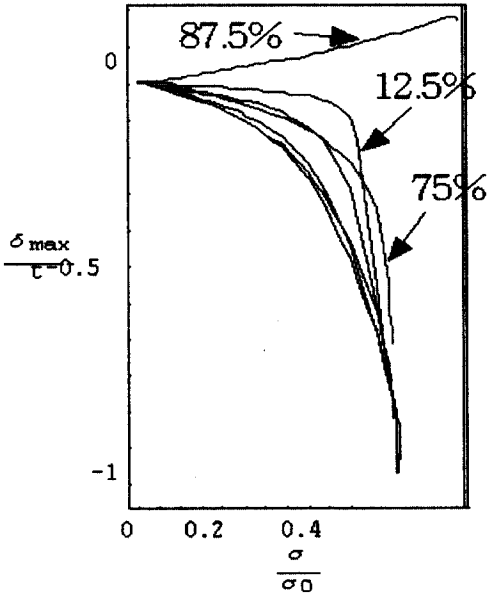


Fig. 3.4 Load-deflection curves according to the variation of doubler length

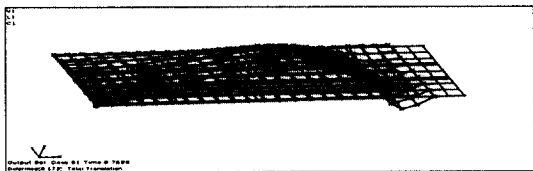


Fig. 3.5 Deformed shape of doubler plate (1/4 model)

4. 이중판과 주판(main plate)의 접촉 효과 검토

이중판이 주판과의 접촉문제는 그 강도 평가를 보다 복잡하게 한다. 즉, 이중판은 주판과 주변의 연결된 용접부 외에는 하중 작용시에 사이가 벌어지거나 반대로 서로 밀착되어 서로간에 힘을 전달하게 된다. 이 접촉효과를 고려치 않을 때에는 이중판이 아무런 외부의 구속을 받지 않고 주판 속으로 들어가는 비현실적인 거동을 보일 수가 있으며 이로 인해 강성과 강도가 크게 잘못 평가될 수

있다. 따라서 본 해석의 경우에 이들 영향을 보다 정확히 고찰하기 위해, gap요소로 모델링하여 주판과 이중판의 접촉관계를 고려한 경우와 무시한 경우 즉 용접부만 연결되고 상호의 접촉거동을 부여치 않은 경우와 상호 비교를 수행하였다. 강도를 기준으로 각 경우에 대한 강도비교를 수행하였고 그 결과를 Table 4.1에 제시하였다.

Table 4.1 Strength comparison for the contact effect of doubler

parametric level	main plate corrosion (range: 0-0.275, 1 step)			doubler thickness (range: 0.25-1.25, 7 step)			doubler breadth (range: 0.125-0.875, 7 step)			doubler length (range: 0.125-0.875, 7 step)		
	no	yes	difference (%)	no	yes	difference (%)	no	yes	difference (%)	no	yes	difference (%)
1	0.001	0.001	0	0.025	0.025	0	0.019	0.019	0	0.751	0.751	0
2	0.025	0.025	0	0.175	0.175	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0
3	0.025	0.025	0	0.125	0.125	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0
4	0.025	0.025	0	0.025	0.025	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0
5	0.025	0.025	0	0.025	0.025	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0
6	0.025	0.025	0	0.025	0.025	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0
7	0.025	0.025	0	0.025	0.025	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0
8	0.025	0.025	0	0.025	0.025	0	0.024	0.024	0	0.981	0.981	0

이 표로부터 접촉관련 효과의 무시는 현 해석에서 최대 1.1%의 강도에 영향을 미치므로 강도에 크게 기여하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 본 해석과 유사한 해석이 다시 수행될 때 접촉효과를 고려하기 위해 많은 gap요소를 설치한다거나 gap강성을 얻기 위한 추가적인 고려사항 없이 이를 무시한 해석도 바람직할 것으로 사료된다. 그러나, 본 해석에서 아직 다루지 않았지만 추후 연구사항인 면내전단, 양측 및 횡하중 등의 각종하중과 이중판이 주판의 폭과 길이방향으로 넓게 분포된 경우는 접촉의 영향이 본 해석과 같이 무시 가능하다고는 단정할 수 없다고 생각된다.

5. 등가 평판 두께 산정

앞선 주판 부식, 이중판 두께 변화 등 각 영향 인자의 변화에 따른 하중-처짐 곡선의 변화와 강도의 증감을 살펴보았으며 여기서 강도의 변화는, 같은 크기의 판부재에서 판두께의 변화와 직접관

제가 있으므로 이들 강도의 변화량을 판두께의 설계변화에 얼마나 깊은 관계가 있나를 살펴보기 위해 강도 변화치를 이중판이 없을 경우의 판부재 두께의 변화 정도로 검토하여 본다.

5.1 수치해석을 통한 등가 평판 두께식의 도출

먼저, 이중판 강도의 영향을 판 두께의 변화로 고찰하기 위해 이중판이 부착되지 않은 평판에 길이 방향 면내 일축하중이 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.

Table 5.1 Strength of equivalent flat plate

Slenderness ratio, β_F	δ_0 / t	σ_F / σ_0
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

이를 위해 각 평판두께의 변화에 따른 평판의 강도를 추가적인 탄소성 수치해석을 통해 시리즈 해석을 수행하여 두께 별 평판두께의 강도치를 Table 5.1과 같이 얻었다. 여기서, 평판의 초기 처짐값은 Jastrzebski/Kmiecik(1986)의 상선의 제측치 값을 다음과 같이 사용하였다.

$$\frac{\delta_0}{t} = 0.0094 (b/t) - 0.205 \quad (5.1)$$

여기서, δ_0 : 판의 초기 처짐
 b : 판의 폭
 t : 판의 두께

상기 표를 이용하여 Fig. 5.1 과 같은 세장비 (β_F)-응력($\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$)선도를 도출할 수 있다.

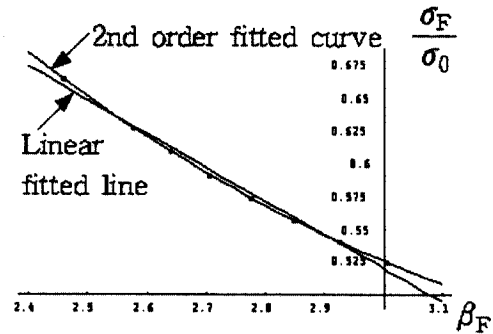


Fig. 5.1 Correlation curve of flat plate between slenderness ratio, β_F and normalized stress, σ_F/σ_0 .

상기 그림에서 2차식의 표현이 1차식 보다 확연히 정확성 있는 표현으로 세장비(β_F), 응력($\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$)항의 다음의 식 (5.2) 혹은 (5.3)으로 표시될 수 있다.

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 2.284 - 0.987\beta_F + 0.134\beta_F^2 \quad (5.2)$$

$$\beta_F = 7.739 - 13.112 \frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 7.782 \left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (5.3)$$

여기서, σ_F : 등가 평판의 강도
 β_F : 등가평판의 세장비
 σ_0 : 항복 응력

따라서, 이중판이 면내 일축하중을 받는 경우의 강도를 구하여 식(5.3)의 σ_F 에 대입하면 얻어진 등가평판의 세장비 β_F 로 등가 평판의 두께가 도출된다. 따라서 상기 식을 이용하여 이중판 구조와 등가의 강도를 가지는 등가 평판두께가 얻어질 수 있다.

5.2 등가평판의 강도와 좌굴강도와의 상관관계 검토

앞 절의 도출식으로 길이방향 일축하중을 받는 이중판의 강도에 증가하는 평판두께를 도출하는 간이식을 개발하였고 본 절에서는 간이식 개발을 위해 추가적인 등가평판의 시리즈해석을 통해 얻은 세장비에 대한 강도값과 좌굴강도와의 상관관계를 검토하여 본다. 이를 위해 5.1절에서 수행한 등가평판의 강도에 따른 판두께 변화의 영향은 본인 등이 개발한 다음의 좌굴강도 식(5.4)을 이용하여 강도변화에 따른 두께변화를 검토하여 보았다(Paik et al. 1992, 합주혁/김을년 1997).

$$\Gamma_B = \left[\frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{\sigma_{xcr}} \right]^{a_1} - \eta_a \leq 0 \quad (5.4)$$

여기서,

η_a : 좌굴에 관한 안전계수(1.0으로 잡는다)

σ_x : 판길이 방향으로 작용하는 압축응력 (인장응력 작용시는 0으로 취급)

σ_{xcr} : 판길이 방향으로 축압축에 대한 임계 좌굴응력으로 이는 소성 수정인자에 의해 수정됨

σ_{rex} : 판길이 방향으로 작용하는 잔류응력

$a_1 - a_4$: 판의 가로-세로비(=a/b)와 폭두께비(=b/t√σ₀/E)에 의해 결정되는 상수(Paik et al. 1992)

본 좌굴강도식은 각종 면내 작용하중만이 아니라 동시에 횡수압을 받는 경우 직사각형판의 하중-처짐 곡선의 거동으로부터 탄성 좌굴강도로 정의하여 유도되었다(Paik et al. 1992).

$$\sigma_{xcr}^* = R_{qx} \cdot \sigma_{xcr} \quad (5.5)$$

여기서,

σ_{xcr}^* : 횡수압과 판길이 방향으로 압축력이 동시에 작용할 때의 좌굴응력

σ_{xcr} : 횡수압이 작용하지 않을 때의 판길이

방향 임계압축좌굴응력

R_{qx} : 판길이 방향의 횡수압의 영향을 나타내는 파라메타

$$= (1 + \alpha Q)1/2$$

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= \sigma E \text{ } 0.5 > \sigma E/\sigma_0 \text{ 영역} \\ &= \sigma_0 \{-0.0847(\sigma E/\sigma_0)^4 + 0.5857(\sigma E/\sigma_0)^3 - 1.5631(\sigma E/\sigma_0)^2 + 2.0784(\sigma E/\sigma_0) - 0.2164\} \text{ } 0.5 \leq \sigma E/\sigma_0 < 1.9 \text{ 영역} \\ &= \sigma_0 \text{ } 1.9 \leq \sigma E/\sigma_0 \text{ 영역} \end{aligned} \quad (5.6)$$

여기서,

σ_{cr} : 일축 압축력이 작용할 때의 임계좌굴응력 (판길이 혹은 폭방향에 따라 σ_{xcr} 혹은 σ_{ycr})

σE : 일축 압축력이 작용할 때의 Euler 탄성 좌굴응력(판길이 혹은 폭방향에 따라 σ_{xE} 혹은 σ_{yE})

σ_0 : 항복 응력

상기의 좌굴강도 식(5.4-5.6)과 추가적 수치해석을 통한 등가평판의 강도의 상관관계를 얻기 위해 수치해석에서 얻은 등가평판강도에 상당하는 하중을 만족하는 세장비를 좌굴강도식을 이용하여 계산하였다. 각 좌굴하중, σ_B 의 경우의 최소 두께를 주는 세장비 β_B 와의 관계를 Table 5.2에 정리하였다.

또한 이를 Fig. 5.1과 같은 좌표축 형태로 함께 표현하면 세장비(β_F)-하중($\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$)선도는 Fig. 5.2와 같다.

Table 5.2 Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio

Slenderness ratio, β_B	δ_0 / t	σ_B / σ_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

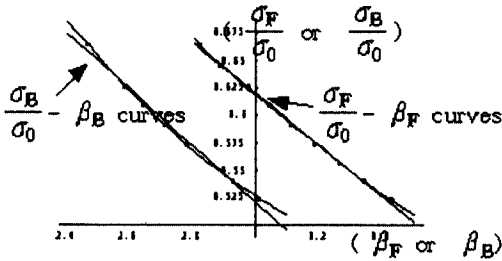


Fig. 5.2 Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress

상기 그림으로부터 두 곡선들 간에는 비교적 일정한 간격의 평행관계를 유지하고 있음을 알 수 있고 이를 다음의 선형식 (5.7)으로 근사화하였다.

$$\beta_F = \beta_B + 0.6460 - 0.4201 \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \quad (5.7)$$

이로부터 수치해석을 통해 도출한 식(5.3)과 마찬가지로 좌굴 평가식과의 상관관계로부터 도출한 식(5.7)을 이용하여 평판의 등가두께를 산출할 수 있다.

6. 강도분석을 통한 설계 및 평가 지침

앞서 도출한 등가두께 도출을 위한 간이식을 이용하여 각 파라메타의 변화에 따른 강도 변화를 앞서 도출한 등가 평판 두께의 변화로 대치하여

표시하면 좌변의 Fig 6과 같다.

Fig. 6 Equivalent flat plate thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate

여기서, 횡축은 각 파라메타는 주판길이에 대한 이중판 길이($\frac{a_d}{a}$), 주판두께에 대한 이중판 두께($\frac{t_d}{t}$), 주판 폭에 대한 이중판 폭($\frac{b_d}{b}$) 그리고 주판두께에 대한 이중판 부식두께($\frac{t_c}{t}$) 각각의 무차원화된 값을 나타내며 종축은 주판두께에 대한 등가 평판두께($\frac{t_{eq}}{t}$)의 무차원화된 값을 나타낸다. 본 그림으로부터 일축 면내하중을 받는 이중판으로 보강된 비교적 세장한 직사각판에 대한 설계 및 강도평가 분석을 통해 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 상기 그림으로부터 무차원화된 등가 평판두께를 지시하는 3곡선, 즉 이중판 두께(td) 및 폭(bd) 그리고 주판의 부식(tc)을 표시하는 무차원 곡선들이 약 0.96-1.06 사이에 분포하고는 반면 길이가 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 짧을 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 등가평판 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.

7. 결 론

이중판의 접촉효과를 고려하여 가장 기본적으로 중요한 하중인 길이방향의 일축하중을 받는, 대표적인 이중저의 가로세로비를 가지는 세장한 판부재를 대상으로 탄소성 비선형 구조강도 평가의 시리즈 해석을 수행하였고 이의 모델링 상세를 제시하였다.

본 해석을 통하여 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식의 영향 등 각종 파라메타의 영향에 따른 이중판의 강도의 변화특성을 제시하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 주판과 같은 두께인 기준 두께 보다 이중판 두께가 감소하는 경우 초기 편심량의 감소에 따라 초기 강성이 높은 값을 유지하다 급격히 강성이 하락되는 전형적 좌굴현상에 가까워지는 경향이 있으며 이중판 두께 증가에 따른 일반적인 강도의

증가가 확인된다.

- 주판의 부식에 따라 점차적인 강도의 감소 경향을 확인할 수 있고 부식 증가에 따라 하중-처짐 곡선이 교차되지 않고 전반적인 하향 평행 특성 즉, 강성 및 강도의 감소 경향을 보이고 있음을 파악할 수 있다.

- 이중판 두께의 감소와 같이, 이중판 폭 감소에 따른 강성의 감소를 보이거나 이에 따른 초기 편심의 구역의 축소로 초기강성이 상승하는 효과를 나타내고 있다.

- 이중판 길이 감소에 따른 강도의 감소를 보이며 초기 편심 영역, 즉 이중판 보강 영역의 축소에 따른 초기 강성의 효과는 폭, 두께 변화의 경우와 유사하다. 그러나 길이 증가에 따라 점차적인 강도의 상승과 마지막 단계인 87.5%의 이중판 길이에서는 급격한 강도의 증가를 보이는데 이는 이중판이 거의 판의 길이에 걸쳐 부착되어 강도가 상승하게 되며 급격한 횡방향의 처짐이 유발되지 않는다.

이중판의 접촉효과를 고려하여 보았고 이로부터 이중판 해석시 이중판과 주판의 접촉 효과는 최대 1.1% 이내의 오차를 주므로 본 해석과 유사한 경우 무시가 가능하다고 사료된다. 그러나 본 해석에서 다루지 않은 면내 전단, 양축 및 횡하중 등이 작용하거나 이중판이 폭, 길이 공히 넓게 분포된 경우 등에 대해서는 같은 양상의 발생을 보장할 수 없으므로 추가적인 고려가 필요할 것으로 사료된다.

이중판의 보강에 따른 등가 평판두께를 도출하기 위해 탄소성 수치해석을 통한 결과로부터 간이 등가 평판두께 간이식을 도출하였고 저자가 기 개발한 좌굴강도 평가식을 이용하여 등가 평판 두께와 비교한 결과 비교적 일정한 상관관계를 보이고 있음을 확인함에 따라 좌굴평가식으로부터 등가평판을 도출할 수 있는 간이식도 도출하여 보았다.

마지막으로 각 파라메타변화에 따른 등가 평판 두께의 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 위

해서는 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.

본 연구에서 연구의 간편화, 단순화를 위해 가정되어 고려될 수 없었고 많은 해석 및 분석 작업이 요구되는 구조부위별 다양한 가로세로비, sturdy한 치수, 면내양측, 전단하중 및 횡하중의 영향, 용접부의 용력집중 및 강도, 피로강도 등의 연구를 개발 이론 및 간이식의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 실험과 더불어 한 단계씩 단계별 연구를 진행하고 이를 통합시킬 계획이다.

참 고 문 헌

- 김외현, 함주혁, 김을년 1993 "건조선 통계자료를 이용한 선박판부재의 최종강도 간이추정," 대한조선학회논문집, 제30권 제4호, pp.127-135.
- 임상전, 장창두, 나승수 1982 "보강된 유공판의 좌굴강도해석(제1보) -압축좌굴-, " 대한조선학회지, 제19권 제4호, pp.11-18.
- 장창두, 나승수 1985 "보강된 유공판의 좌굴강도 해석(제3보) -압축 및 전단좌굴-, " 대한조선학회지, 제22권 제1호, pp.9-20.
- 한국선급 1999 "선급 검사내규," 검사내규 30211, 3-2-12(Rev. 32, 37) - 3-2-19.
- 함주혁, 김을년 1994 "건조중인 선박에서의 기관실 상갑판 판부재의 처짐 예측," 대한조선학회논문집, 제31권 제3호, pp119-128.
- 함주혁, 김을년 1994 "선박 선저외판의 좌굴특성에 관한 연구 - 보강재의 구속영향 검토 -, " 대한조선학회논문집, 제31권 제4호, pp130-138.
- 함주혁, 김을년, 정윤석 1996 "면내 인장력을 고려한 판부재의 좌굴강도 평가식 개발," 대한조선학회논문집, 제33권 제2호, pp.111-118.
- 함주혁, 김을년 1997 "선박 판부재의 개선된 좌굴평가 시스템의 개발," 대한조선학회논문집, 제34권 제3호, pp.53-60.
- 함주혁 1998 "선박 이중판(doubler)의 강도에 관한 연구," '98(6차년도) 산학연 공동기술개발 지역컨소시엄 과제별 최종 보고서, pp.51-91.
- J.K. Paik, J.H. Ham and U.N. Kim 1992 "A New Plate Buckling Design Formula," J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, pp.559-566.
- J.K. Paik, J.H. Ham and J.H. Ko 1992 "A New Plate Buckling Design Formula(2nd Report) - On the Plasticity Correction -, " J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.172.
- Jastrzebski T. & Kmiecik M. 1986 "Statistical investigations of the deformations of ship plates," Bull. Assoc. Tech. Marit. Aeronaut., 86(1986), pp.325-45.
- MacNeal-Schwendler co. 1999 "MSC/NASTRAN for Windows," Release Guide Version 4.
- Sang H. Lee 1990 "MSC/NASTRAN Handbook for Nonlinear Analysis," Version 67(Draft).
- Takeshi Nagano, Shinji Kumasaki 1978 "Buckling strength of a web panel with holes - 2nd report Buckling strength under shearing stress and the effect of reinforcement-, " 石川島播磨技報, Vol.18 No.3, 昭和53年 5月.



〈함주력〉