

## 양축방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도 평가

함주혁\*

### Strength Evaluation of a Doubler Plate of Ship Structure subjected to the Biaxial In-plane Compression

Juh-Hyeok Ham\*

#### 요 약

선박 판부재를 대상으로 중요한 하중경우의 하나인 양축방향 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 양축방향 면내 압축하중을 받는 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 doubler plate subjected to the biaxial in-plane compression has been performed through the systematic evaluation process.

In order to estimate the proper static strength of doubler plate, 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 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. 서론

본 연구는 종방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가(함주혁 1999)에 이어 양측방향 면내 압축력을 받는 선박 이중판의 강도 평가와 관련된 내용임을 먼저 밝힌다. 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 국내의 적으로 찾아보기 힘들다(Takeshi/Shinji 1978) (한국선급 1999).

본 연구에서는 선박의 대표적인 판부재를 대상으로 가장 기본적인 하중인 판부재의 면내 길이방향 및 폭방향 하중, 즉 양측 방향 면내하중을 작용시키면서 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식 영향 등의 각종 파라메타 영향에 따른 이중판의 강도평가를 이중판의 집축 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 평가지침 등을 제시하였다. 또한 좌굴평가식(Paik 등 1992)과 등가평판 도출식과의 상관성을 파악하고 관계식을 정립하였다.

이들 축적된 자료를 바탕으로 차후의 이중판 강도 추정식 개발에 이용할 계획이다.

## 2. 이중판 강도 해석

이중판의 강도평가는 고려해야하는 복잡한 많은

하중성분이 존재하나 일차적으로 판부재에 작용하는 주요하중인 면내 종방향하중에 이어 면내 양측 방향 하중을 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 쉬운 국내 조선소의 산적화물선의 늑판과 종보강재 치수를 대표적 구조로 간주하여 판부재의 가로세로비를 정하는데 이용하였다.

이 조사자료의 예를 Table 1에 제시하였다. 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 양측 면내하중만을 고려하므로 비교적 세장한 판을 대상으로(세장비가 약 2.7)기준 모델로 선정하였다. 후판 및 극심한 횡하중 등의 다양한 항목들에 대한 고려는 추후 연구에서 계속될 것이다.

Table 1 Space of solid floor and longitudinal stiffener(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

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 그리고 판 길이의 1/48로 판요소를 사용하여 모델링하였다.

- 이중판 배치

판의 중앙부에 주판(main plate)와 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 다음 페이지의 Fig.1에 나타내었다.

이 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 7단계

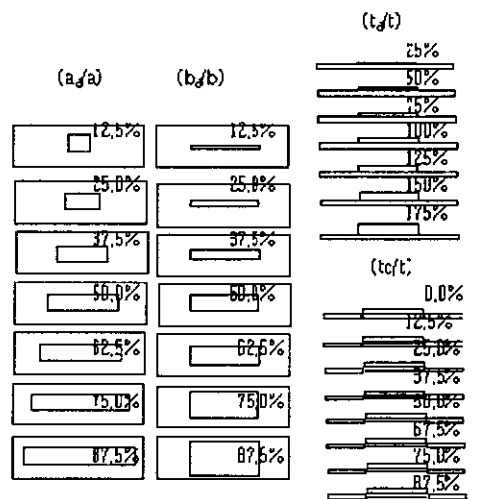


Fig.1 Parametric variation of doubler plate structure

로 변화시켰고, 주판두께에 대한 이중판 두께 ( $\frac{t_d}{t}$ )를 25%에서 175%까지 25% 간격으로 7 단계를, 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 길이 및 폭 방향의 면내 양축 하중이 작용하는 모델 및 하중이 대칭을 이루고 있어 많은 부분의 거동이 대칭적인 거동을 보일 것으로 보이나 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 사용하기 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 약 1,500개와 1,000개로 그 개요는 다음과 같다.

- 표준 한모델의 총 요소수 : 약 1,500 개
- 판 요소 : 약 1,000 개

- gap 요소: 약 200 개
- 보 요소 : 약 300 개
- 총 절점수 : 약 1,000 개

- 하중

판부재의 하중은, 판부재의 길이 및 폭방향 면내하중을 각각의 임계 좌굴 응력비로 점진적으로 증가시키면서 하중-처짐 거동을 분석하였다. 판 길이방향의 전 모델이 사용되었으며 두단부 중 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. 판 폭방향의 하중도 마찬가지로 판 길이방향 하중과 같은 개념으로 작용시켰다.

- 경계조건

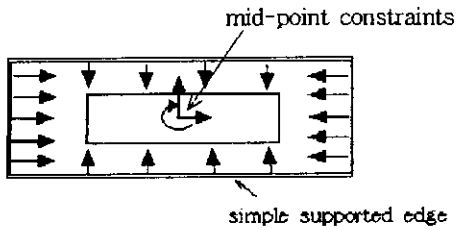
판부재의 보강재가 설치되는 위치인 판의 주변 경계부가 직선을 유지시키기 위해 강한 보요소를 설치하였으며 판부재의 거동에 추가적 강성이 고려되지 않도록 비틀림강성과 단면적은 극소화시켰다.

대칭적 모델 및 하중이 작용하였으므로 판부재의 정중앙부의 한 절점에 강체이동이 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.2에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 판부재 주변 4 단부는 판의 수직방향의 이동을 구속하였다.

- 해석 프로그램

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



**Fig.2** Constraints at center point and boundary edges with biaxial in-plane load

- 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-Rhapson법을 일관성 있게 채택하게 되었다.

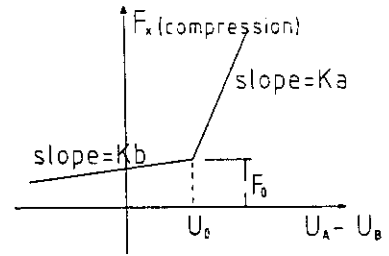
- 재료특성

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.3은 갭요소에 대한 축응답의 일 예를 제시하였다. 압축에서는 높은 강성의  $K_a$ 와 무시할 정도의 강성인  $K_b$ 인 두 가지



**Fig.3** Gap Axial Force vs. Deflection

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 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  $10^{-8}$ 배 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 국부강성

K(db): 주판과 접촉하는 이중판의 절점 국부강성

$U_a$  : a점의 갭 축방향 이동량

$U_b$  : b점의 갭 축방향 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.4에 나타내었다.

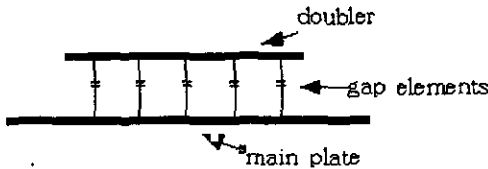


Fig.4 Gap elements between main plate and doubler plate

### 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 3.1에 제시하였다. Fig.3.1의 2차원 좌표에서 바닥의 가로축은 작

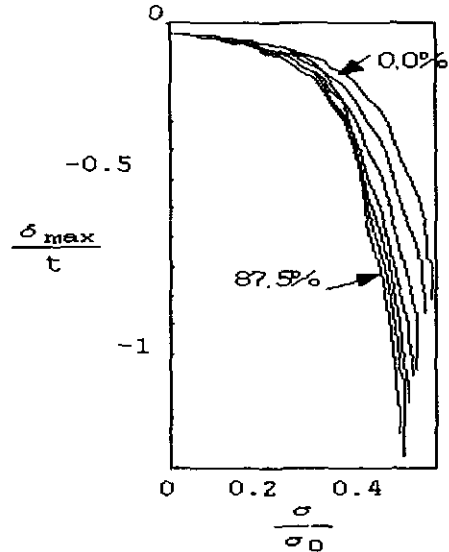


Fig.3.1 Load-deflection curves according to the variation of main plate corrosion

용하중을 항복하중으로 무차원화시킨 값 ( $\frac{\sigma}{\sigma_0}$ )으로 판부재의 면내 양축방향 하중의 크기를, 세로축은 판의 수직방향 최대 처짐을 판두께로 나누어 무차원화 ( $\frac{\delta_{max}}{t}$ ) 시켰으며 곡선들은 주판의 부식된 두께를 새판 두께로 나누어 부식의 정도 ( $\frac{t_c}{t}$ )를 %로 나타내었다. 상기 그림으로부터 미소한 차이를 보이긴 하나 주판의 부식이 비교적 작은 경우에는 부식에 따른 점차적인 강도의 감소를 확인할 수 있고 부식 증가에 따른 하중-처짐곡선의 전반적인 하향성 보이고 있음을 파악 할 수 있다.

여기서 판처짐의 형상은 3반파가 주도하며 판에 수직한 처짐성분의 최대치는 판의 중앙에 부착된 이중판의 영향으로 중앙에서의 처짐이 작고 판 양쪽의 성분이 하중-처짐 상관관계를 지배하고 있다(Fig.3.2 참조). 그러나 부식량이 증가함에 따라 이중판이 설치된 판 중앙부의 처짐량이 점차 증가되어 가면서 주판의 부식이 큰 경우의 최대처짐 위치는 판 중앙부로 점차 이동되어 이들 반대

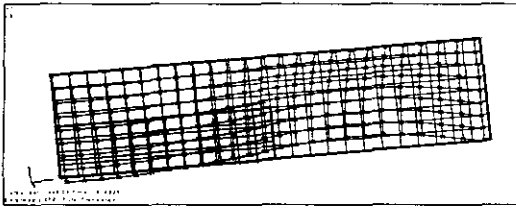


Fig.3.2 Deformed shape of 12.5% corrosion of main plate under the doubler(1/4model)

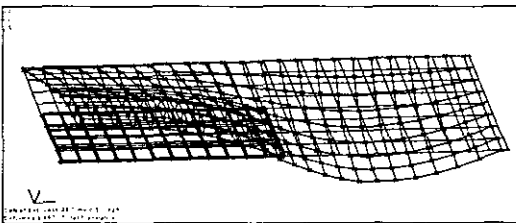


Fig.3.3 Deformed shape of 75% corrosion of main plate under the doubler(1/4 model)

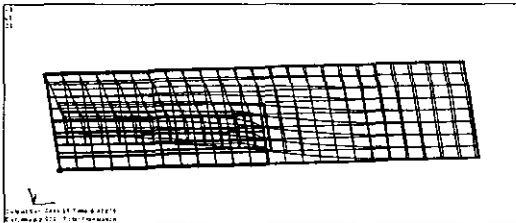


Fig.3.4 Deformed shape of 87.5% corrosion of main plate under the doubler

방향 처짐의 형태는 부식의 증가에 따른 강도의 감소형태가 일관성을 보이지 않고 있다.

이 이유는 하중의 증가에 따라 부식이 작은 경우에서와 같이 명확한 3반파의 좌굴모드로 거동하는 경우와 달리 부식이 50%를 상회하는 경우에는 3반파 형상은 유지하되 판 중앙부에서 최대처짐이 발생하는 경우(Fig.3.3 참조)와 처음부터 1반파와 유사한 형태를 보이는 경우(Fig.3.4 참조)로 대별되면서 이 각 경우의 처짐 응답의 형태에 따라 강도에 변화를 발생시킴을 본 해석을 통하여 파악할 수 있다. 즉, 강도는 3반파의 처짐형상을

유지할 경우 최대 수직처짐 발생위치가 판의 중앙이나 양쪽이나에 상관없이 유사하며 1반파의 처짐형상을 유지할 경우 강도의 하락 정도가 비교적 크음을 확인할 수 있다.

### 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.3.5에 이를 제시하였다.

좌표축은 앞선 부식 영향의 경우와 동일하다.

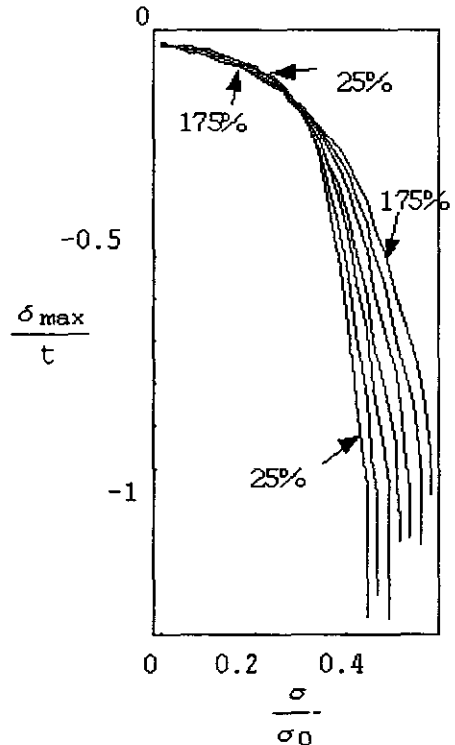


Fig.3.5 Load-deflection curves according to the variation of doubler thickness

3.1절의 주판부식의 하중-처짐 선도와 같이 어느 부식단계에서의 급격하게 서로 상이한 곡선들은 발생하지 않고, 이중판 두께의 변화에 따라 점차적으로 변화하는 곡선군을 이루고 있음을 파악할 수 있다. 또한 주판과 같은 두께인 기준 두께 보다 이중판 두께가 감소하는 경우는 초기 편심량의 감소에 따라 초기 강성이 상대적으로 미소하게 높은 값을 유지하는 반면에 급격히 강성이 하락되는, 즉 좌굴현상에 가까워지는 경향이 있으며 이중판 두께 증가에 따른 뚜렷한 강도의 증가가 확인된다.

3.3 이중판 폭의 영향

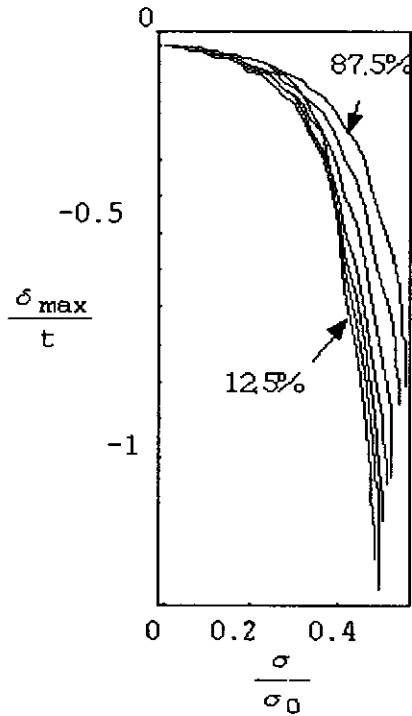


Fig.3.6 Load-deflection curves according to the variation of doubler breadth

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.3.6에 나타내었다.

본 그림으로부터 이중판 폭 감소에 따른 강도의 감소를 보이나 이중판 폭이 줄어든다는 것은 초기 편심의 양이 작아 진다는 의미이므로 이중판 폭의 감소에 따라 초기강성이 미세하게 상승하는 효과를 나타내고 있다. 이들 초기 강성 역시 폭의 증가에 따라 감소하다가 다시 넓은 영역의 이중판 폭에 다다르면 초기 강성 및 강도 공히 증가함을 알 수 있다.

3.4 이중판 길이의 영향

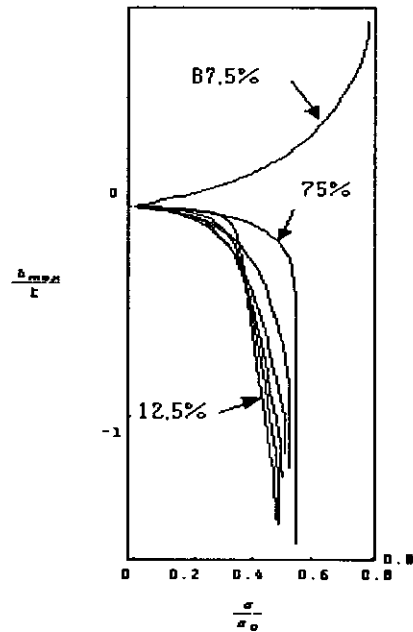


Fig.3.7 Load-deflection curves according to the variation of doubler length

마지막으로 이중판 길이의 변화에 따른 판부재의 하중-처짐 거동을 살펴보기 위해 7단계의 해석을 수행하고 그 결과를 Fig.3.7(다음 페이지 참조)에 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 점차적인 감소를 보이며 초기 편심 영역, 즉 이중판 보강 영역의 축소에 따른 초기 강성의 효과는 폭, 두께 변화의 경우와 유사하게 상승하다가 강도는 줄어드는 일반적인 경향을 보인다. 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 된다.

이 때 이중판은 앞 단계(이중판 길이가 판 길이의 75%일 경우)까지 이중판 길이의 증가에 따라 주된 처짐형상으로 거동한 3반파 좌굴형상이 주도하는 처짐형태(Fig.3.8 참조)에서 이중판 길이가 판길이의 87.5%인 경우에 이르러서는 1반파 형상으로 좌굴모드가 처짐형을 주도하면서 강도의 증가를 보이고 있다. 이 처짐거동의 예를 판부재의 1/4 모델로 Fig.3.9에 나타내었다. 이 이중판 길이의 변화에 따른 하중-처짐곡선은 중앙부는 이중판의 강성 증가로 인해 작은 값을 보이는 반면 판 양측의 처짐이 1반파와 3반파 공히 크게 나타나고 있다.

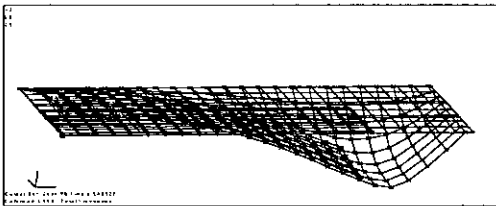


Fig.3.8 Deformed shape of 75% doubler length model(1/4 model)

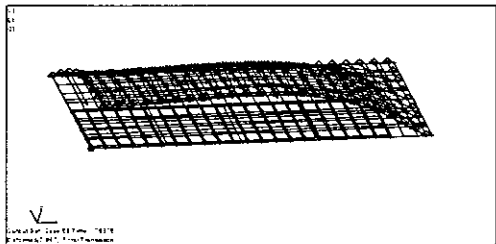


Fig.3.9 Deformed shape of 87.5% doubler length model (1/4model)

#### 4. 등가 평판 두께 선정

앞선 주판 부식, 이중판 두께 변화 등 각 영향 인자의 변화에 따른 하중-처짐 곡선의 변화와 강도의 증감을 개략적으로 살펴보았으며 여기서 강도의 변화는, 같은 크기의 판부재에서 판두께의 변화와 직접 관계가 있으므로 이들 강도의 변화량을 판두께의 설계변화에 얼마나 깊은 관계가 있느냐를 살펴보기 위해 강도 변화치를 이중판이 없을 경우의 판부재 두께의 변화 정도로 검토하여 본다.

##### 4.1 수치해석을 통한 등가 평판 두께식의 도출

Table 4.1 Strength of equivalent flat plate

Slenderness ratio, $\beta_F$	$\omega_0 / t$	$\sigma_F / \sigma_0$
		bi-axial
2.459	0.479	0.498
2.516	0.495	0.466
2.576	0.511	0.436
2.639	0.529	0.393
2.704	0.555	0.364
2.774	0.566	0.338
2.847	0.587	0.313
2.924	0.608	0.289
3.005	0.631	0.266

먼저, 이중판 강도의 영향을 판 두께의 변화로 고찰하기 위해 이중판이 부착되지 않은 평판에 양축 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.

이를 위해 각 평판두께의 변화에 따른 평판의 강도를 추가적인 탄소성 수치해석을 통해

시리즈 해석을 수행하여 두께 별 평판두께의 강도치를 Table 4.1과 같이 얻었다.

여기서, 평판의 초기 처짐값은Jastrzebski (1988)의 상선의 계측치 값을 다음과 같이 사용하였다.

$$\frac{\delta_0}{t} = 0.0094 (b/t) - 0.205 \quad (4.1)$$

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

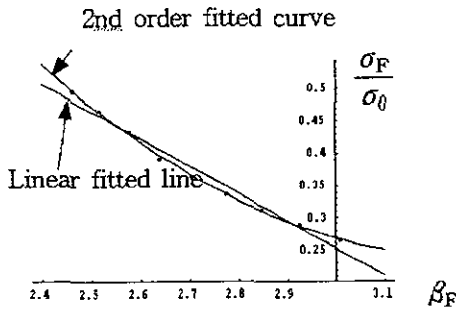


Fig. 4.1 Correlation curve of flat plate between slenderness ratio,  $\beta_F$  and normalized stress,  $\sigma_F/\sigma_0$ .

상기 표를 이용하여 Fig. 4.1과 같은 세장비 ( $\beta_F$ )-응력( $\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$ )선도를 도출할 수 있다.

본 그림에서 2차식의 표현이 1차식 보다 확연히 정확성 있는 표현으로 세장비( $\beta_F$ ), 응력( $\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$ )항의 다음의 식(4.2) 혹은 (4.3)으로 표시될 수 있다.

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 4.395 - 2.533\beta_F + 0.386\beta_F^2 \quad (4.2)$$

$$\beta_F = 4.268 - 6.086 \frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 4.967 \left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (4.3)$$

여기서,  $\sigma_F$ : 등가 평판의 강도  
 $\beta_F$ : 등가평판의 세장비  
 $\sigma_0$ : 항복 응력

따라서, 이중판이 면내 양축하중을 받는 경우의 강도를 구하여 식(4.3)의  $\sigma_F$ 에 대입하면 얻어진 등가평판의 세장비  $\beta_F$ 로 등가 평판의 두께가 도출된다. 따라서 상기 식을 이용하여 이중판 구조와 등가의 강도를 가지는 등가 평판두께가 얻어질 수 있다.

#### 4.2 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 좌굴강도와와의 상관관계를 검토하여 본다. 이를 위해 4.1절에서 수행한 등가평판의 강도에 따른 판두께 변화의 영향은 본인 등이 개발한 다음의 좌굴강도식(4.4)을 이용하여 강도변화에 따른 두께변화를 검토하여 보았다(Paik et al. 1992, 함주혁/김을년 1997).

$$\Gamma_B = \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{\sigma_{xcr}} \right]^{\alpha_1} + \left[ \frac{\sigma_y + \sigma_{rey}}{\sigma_{ycr}} \right]^{\alpha_2} - \eta_a \leq 0 \quad (4.4)$$

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  
 $\alpha_1 - \alpha_2$ : 판의 가로-세로비(=a/b)와 폭두께비(=b/t  $\sqrt{\sigma_0/E}$ )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).

$$\sigma_{xcr} = R_{qx} \cdot \sigma_{xcr} \quad (4.5)$$

여기서,

$\sigma_{xcr}$  : 횡수압과 판길이(x)방향으로 압축력이 동시에 작용할 때의 좌굴응력

$\sigma_{xcr}$  : 횡수압이 작용하지 않을 때의 판길이(x) 방향 임계압축좌굴응력

$R_{qx}$  : 판길이 방향의 횡수압의 영향을 나타내는 파라메타

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

$$\alpha = 0.025(a/b)^2 - 0.155(a/b) + 0.360 \dots \text{ for } \sqrt{2} \leq a/b < 4$$

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

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

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

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

$$= \sigma_0 \{-0.0847(\sigma_E/\sigma_0)^4 + 0.5857(\sigma_E/\sigma_0)^3 - 1.5631(\sigma_E/\sigma_0)^2 + 2.0784(\sigma_E/\sigma_0) - 0.2164\}$$

$$\text{----- } 0.5 \leq \sigma_E/\sigma_0 < 1.9 \text{ 영역}$$

$$= \sigma_0 \text{ ----- } 1.9 \leq \sigma_E/\sigma_0 \text{ 영역} \quad (4.6)$$

여기서,

$\sigma_{cr}$ : 일축 압축력이 작용할 때의 임계 좌굴응력 (판길이 혹은 폭방향에 따라  $\sigma_{xcr}$  혹은  $\sigma_{ycr}$ )

$\sigma_E$ : 일축 압축력이 작용할 때의 Euler 탄성 좌굴응력 (판길이 혹은 폭방향에 따라  $\sigma_{xE}$  혹은  $\sigma_{yE}$ )

$\sigma_0$ : 항복 응력

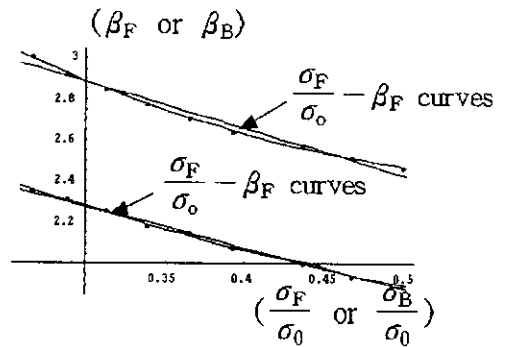
상기의 좌굴강도식(4.4-4.6)과 추가적 수치해

석을 통한 등가평판의 강도의 상관관계를 얻기 위해 수치해석에서 얻은 등가 평판강도에 상응하는 하중을 만족하는 세장비를 좌굴강도식을 이용하여 계산하였다.

각 좌굴하중,  $\sigma_B$ 의 경우의 최소 두께를 주는 세장비  $\beta_B$ 와의 관계를 Table 4.2에 정리하였다.

**Table 4.2** Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio

Slenderness ratio, $\beta_B$	$\omega_0 / t$	$\sigma_B / \sigma_0$
biaxial	biaxial	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



**Fig.4.2** Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress

또한 이를 Fig. 4.1과 같은 좌표축 형태로 함께 표현하면 세장비( $\beta_F$ )-하중( $\frac{\sigma_F}{\sigma_0}$ )선도는 Fig. 4.2와 같다.

이 그림으로부터 두 곡선들 간에는 비교적 일정한 간격의 평행관계를 유지하고 있음을 알 수 있고 이를 다음의 선형식 (4.7)로 근사화 하였다.

$$\beta_F = \beta_B - 0.7044 + 0.3198 \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \quad (4.7)$$

이로부터 수치해석을 통해 도출한 식(4.3)과 마찬가지로 좌굴 평가식과의 상관관계로부터 도출한 식(4.7)을 이용하여 평판의 등가두께를 산출할 수 있다.

5. 강도분석을 통한 설계 및 평가 지침

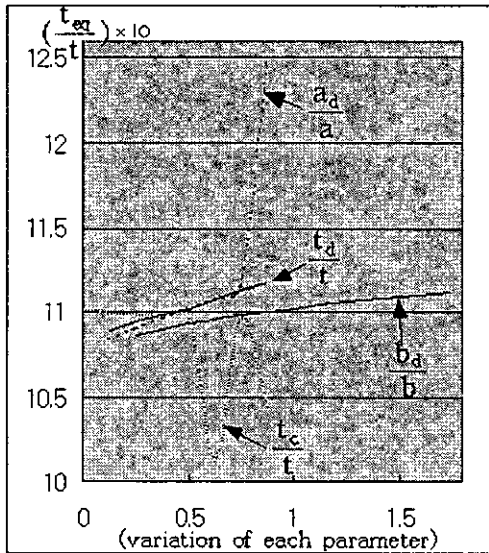


Fig.5 Equivalent flat plate thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate

앞서 도출한 등가두께 도출을 위한 간이식을 이용하여 각 파라메타의 변화에 따른 강도 변화를 앞서 도출한 등가 평판 두께의 변화로 대치하여 표시하면 다음 Fig 5와 같다.

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 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 지시하는 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% 증대시켜 15-25%의 등가 평판두께의 증가효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다.

- 양축 방향 면내 축하중이 지배하는 경우 길이 방향의 이중판 확대는 그 길이가 극히 긴 경우에 급격한 강도의 증가를 보이나 이를 제외하고는 다른 보강법 특히 보강판의 두께 및 폭 변화에 따른 등가평판두께의 변화폭이 유사한 범위에 존재한다

고 볼 수 있다.

- 두께 및 폭의 증감에 따른 영향은 강도가 유사하며, 거의 직선적 변화를 보이는 것은 일축면 내하중의 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.

## 7. 결론

이중판의 접촉 효과를 고려하여 가장 기본적으로 주요하중인 길이방향의 일축하중을 받는 경우에 이어 양축 면내하중을 받는 하중경우에 대해, 대표적인 이중저의 가로세로비를 가지는 판부재를 대상으로 탄소성 비선형 구조강도 평가의 시리즈 해석을 수행하였고 이 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 경우는 초기 편심량의 감소에 따라 초기 강성이 상대적으로 미소하게 높은 값을 유지하다 급격히 강성이 하락되는, 즉 좌굴현상이 가까워지는 경향이 있으며 이중판 두께 증가에 따른 뚜렷한 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. 그러나 부식이 증가됨에 따라 이중판이 설치된 판 중앙부의 처짐량이 점차 증가되어 주판의 부식이 큰 경우의 최대 처짐 위치는 판

중앙부로 점차 이동되어 이들 반대방향 처짐의 형태는 부식의 증가에 따른 초기강성의 감소형태가 다른 부식상태의 하중-처짐 곡선에 비해 상이한 특성을 보인다

- 이중판 두께의 감소와 같이, 이중판 폭 감소에 따른 강성의 감소를 보이거나 이에 따른 초기 편심의 구역의 축소로 초기강성이 상승하는 효과를 나타내고 있다. 초기 강성 역시 폭의 증가에 따라 감소하다가 다시 넓은 영역의 이중판 폭에 다다른 초기 강성 및 강도 공히 증가함을 알 수 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. 여기서 이중판 길이가 판길이의 75%일 경우까지는 이중판 길이의 증가에 따라 주된 처짐 형상으로 거동한 3반파 좌굴형상이 주도하는 처짐형태에서 이중판 길이가 판길이의 87.5%인 경우에 이르러서는 1반파 형상으로 좌굴모드가 처짐형을 주도하면서 강도의 증가를 보이고 있다.

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

마지막으로 각 파라메타 변화에 따른 등가 평판 두께의 비교를 통해, 본 연구에서 다루고있는 일반적인 이중판 보강은 등가 평판의 판두께의 변화를 11% 정도 변화시키는 강도 범위 내에 존재하

나 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.

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

참 고 문 헌

- 김의현, 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.
- 장창두, 나승수 1985 "보강된 유공판의 좌굴강도 해석(제3보) -압축 및 전단좌굴-", 대한조선학회지, 제22권 제1호.
- 한국선급 1999, "선급검사내규," 검사내규 30211, 3-2-12(Rev. 32, 37) - 3-2-19.
- 함주혁, 1999, "중방향 면내압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가", 1999년도 추계 학술대회 논문집.
- 함주혁, 김을년 1994 "건조중인 선박에서의 기관실 상갑판 판부재의 처짐 예측," 대한조선학회논문집, 제31권 제3호, pp119-128.
- 함주혁, 김을년 1994 "선박선저외판의 좌굴특성에 관한 연구 - 보강재의 구속영향 검토 -, " 대한조선학회논문집, 제31권 제4호, pp130-138.

- 함주혁, 김을년, 정운석 1996 "면내인장력을 고려한 판부재의 좌굴강도 평가식 개발," 대한조선학회논문집, 제33권 제2호, pp.111-118.
- 함주혁, 김을년 1997 "선박판부재의 개선된 좌굴 평가 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. 1988 "Allowable Distortions in Shipbuilding Plates -Some Technical Aspects-, " Bulletin Technique du Bureau Veritas, No.4.
- 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, 제18권 제3호, 昭和53年 5月.



<함주혁>