

## 면내 조합하중과 횡압을 받는 선박 이중판의 강도 평가

함주혁<sup>†\*</sup>

한라대학교 시스템응용공학부\*

### Strength Evaluation of a Doubler Plate of Ship Structure subjected to the In-plane Combined Load and Lateral Pressure Load

Juh-Hyeok Ham<sup>†\*</sup>

School of System Applied Engineering, Halla University\*

#### Abstract

A study for the structural strength evaluation of doubler plates subjected to the in-plane combined load and lateral pressure load has been performed through a systematic evaluation process. In order to properly estimate the 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 the analysis 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 plate thickness formula and the developed buckling strength formulas for intact plates by author et al. is discovered and these relations are formulated for the future development of simple strength evaluation formula of doubler plate structure.

※Keywords: Doubler plate(이중판), Strength Evaluation(강도평가), In-plane combined load(면내 조합하중), Lateral pressure(횡압), Ship structure(선박구조)

---

접수일:2003년 7월 22일, 승인일:2003년 10월 13일

† 주저자, E-mail: jhham@hit.halla.ac.kr

Tel:033-760-1236

#### 1. 서 언

본 연구는 종방향 및 양측방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가(함주혁, 1999/2001)

에 이어 면내 조합하중과 수압을 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), 장창두와 나승수(1985) 및 Takeshi and Shinji(1978) 그리고 판부재의 강도 및 최종강도와 관련하여 Paik et al.(1992), 김외현 등(1993)을 비롯한 많은 연구실적들이 있다. 최근에는 판부재의 좌굴강도 연구와 관련하여 정확도 및 여러 영향인자를 추가적으로 고려하면서(Paik et al., 1992) 시스템화시켜 사용자의 효율성을 한층 높이고 있다(함주혁과 김을년, 1997). 그러나 이중판 나름대로의 장점을 살려서 수리에 직접 적용하기 위한 관련 연구 및 지침이 국내외적으로 찾아보기 힘들다(Takeshi and Shinji, 1978; 한국선급, 1999).

본 연구에서는 선박의 대표적인 판부재를 대상으로 복합적인 면내하중으로 판부재의 길이방향, 폭방향 및 전단하중과 더불어 면외하중인 수압을 작용시키면서 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식 영향 등의 각종 파라메타 영향에 따른 이중판의 강도평가를 이중판의 접촉효과를 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 제시하였

다. 또한 좌굴평가식(Paik et al., 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 하중성분이 존재하므로 본 연구에서는 판부재에 작용하는 주요하중인 면내 양축 및 전단하중과 면외 수압 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 다양한 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 종보강재 치수를 대표적 구조로 간주하여 판부재의 가로세로비를 정하는데 이용하였다.

이 조사자료의 예를 Table 2.1에 제시하였다.

Table 2.1 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

이로부터 판부재는 길이방향이 늑판간격(floor space) 그리고 판폭이 이중저 종늑골 간격(bottom longitudinal space)이므로 이를 일반 선박의 대표적인 가로세로비라고 가정하여 가로세로비가 3인 판부재 모델을 선정하였고 우선적으로 비교적 세장한 판을 대상으로 세장비가 약 2.7 기

준의 모델로 선정하였다. 후판 등의 다양한 추가 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 판 폭의 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. 2.2에 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 7단계로

변화시켰고, 주판두께에 대한 이중판 두께( $\frac{t_d}{t}$ )를 25%에서 175%까지 25% 간격으로 7단계, 그

리고 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.

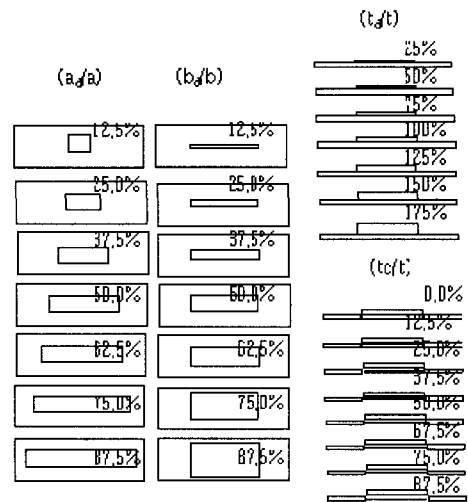


Fig. 2.2 Parametric variation of doubler plate structure

- 모델영역

해석모델은 판의 길이 및 폭 방향의 면내 및 면외하중이 작용하는 모델 및 하중이 대칭성을 이루지 않고 있을 뿐만 아니라 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 폭방향으로 역시 전단하중성분과 이의 거동 때문에 대칭성이 확보되지 못하므로 폭 전체의 모델을 사용하였다.

- 요소 및 절점수

Fig. 2.2에 표시된 총 29개 유형의 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, 폭 및 전단 면내하중과 수압의 면외하중을 각각의 독립적 임계 좌굴 응력비로 점진적으로 증가시키면서 하중-처짐 거동을 분석하였다.

- 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 정 중앙부의 한 절점에 강제이동이 발생하지 않게 하기 위해 면내 회전 및 판길이 및 폭방향의 이동을 제한하였다. 이와 관련된 예를 작용하중과 더불어 Fig. 2.3에 나타내었다.

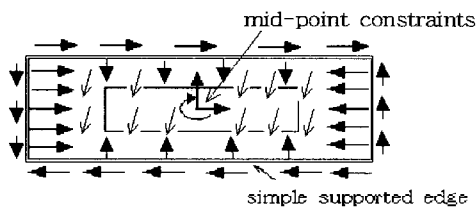


Fig. 2.3 Constraints at center point and boundary edges with in-plane combined & water pressure load

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.

- 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)과 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.

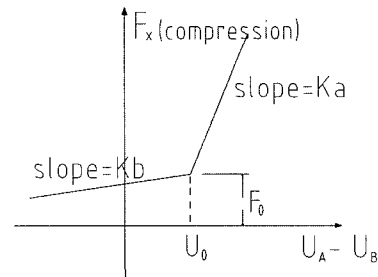


Fig. 2.4 Gap Axial Force vs. Deflection

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. 2.4은 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

갭엘림의 값에 좌우되어 결정된다. 갭요소의 물성치를 부여하는데 근접 갭강성은 인근 자유도에 대한 강성의 1,000배를 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).

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

$$K_b \geq 1 \cdot 10^{-3} \cdot \min[K(m), K(d_b)]$$

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

$K(d_b)$  : 주판과 접촉하는 이중판의 절점 국부강성

$U_a$  : a점(이중판과 연결된 갭요소 일단)의 갭 축방향 이동량

$U_b$  : b점(주판과 연결된 갭요소 타단)의 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  $K_a$ 값을 (2.1)식에 따라 산정 하였다. 이들 주판과 이중판의 마찰력은 미소하다고 가정하여 무시하였다. 이중판과 주판사이에 설치한 갭요소의 개요를 Fig. 2.5에 나타내었다.

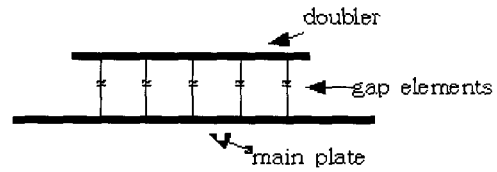


Fig. 2.5 Gap elements between main plate and doubler plate

### 3. 각종 파라메타의 영향 분석

각종 하중-처짐 곡선을 얻고 이들을 상호 비교하기 위하여  $p-\delta^2$  (하중-횡처짐 제곱)도표에서 얻어낼 수 있는 좌굴강도 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 Fig. 3.1에 제시하였다.

Fig. 3.1의 2차원 좌표에서 바닥의 가로축은 작

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. 본 그림으로부터 주판의 부식이 증가함에 따라 초기강성과 강도 공히 서서히 감소함을 알 수 있다.

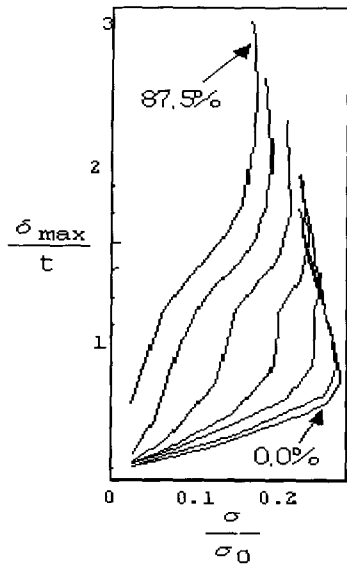


Fig. 3.1 Load-deflection curves according to the variation of main plate corrosion

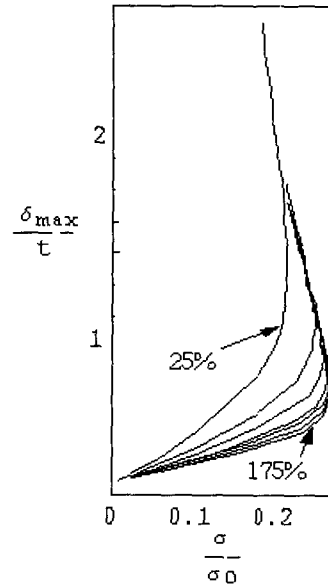


Fig. 3.3 Load-deflection curves according to the variation of doubler thickness

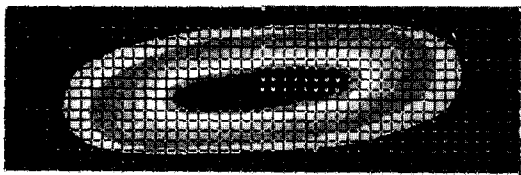


Fig. 3.2 Deformed contour of 50% corrosion of main plate

여기서 판처짐의 형상은 1반파가 주도하므로 판에 수직인 처짐성분의 최대치는 판의 중앙에 발생하고 있다. 그한 예로서 Fig. 3.2에 이중판 하의 주판부가 50% 부식된 경우를 제시하였다. 여러 하중의 조합 때문에 면내 전단도 작용하고 있으나 명확한 전단하중에 의한 처짐 현상은 보이지 않고 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. 3.3에 이를 제시하였다.

좌표축은 앞선 부식 영향의 경우와 동일하다. 본 하중-처짐 곡선에서는 대부분 이중판 두께의 증가에 따라 강도와 초기 강성에 미소한 증가를 보이고 있음을 본 그림으로부터 파악할 수 있다. 그리고 수압에 기인하여 두께의 감소와 상관 없이 초기강성의 점차적인 증가를 보여주고 있다. 이 경우 역시 주판 부식과 같이 일반파가 주된 처짐 형상이며 최대 수직처짐이 판 중앙에 나타난다. Fig. 3.4는 150% 이중판 두께의 경우에 대한 처짐 형상으로 전단하중의 포함에 따른 비교적 명확한 전단처짐 형상이 파악되고 있다.

### 3.3 이중판 폭의 영향

이중판 폭의 변화에 따른 판부재의 강도변화를

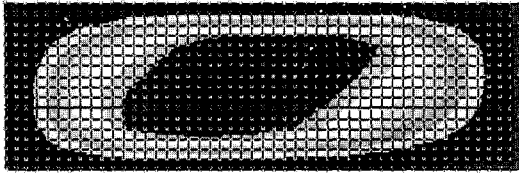


Fig. 3.4 Deformed contour of 150% doubler thickness model

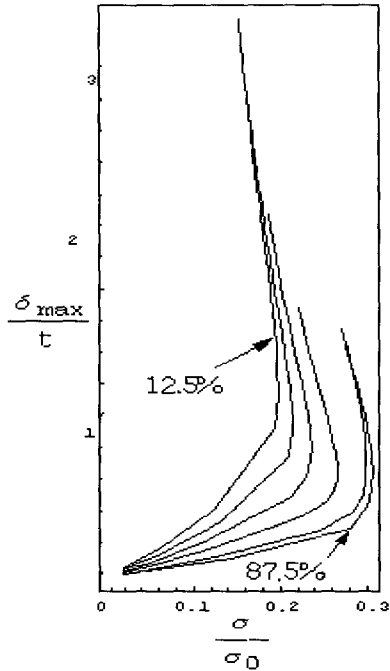


Fig. 3.5 Load-deflection curves according to the variation of doubler breadth

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. 3.5에 나타내었다.

본 그림으로부터 수압 등 복합하중에 의한 영향으로 이중판 폭의 증가에 따른 편심효과에 의한 초기 강성 상승의 효과는 나타나지 않고 있으며 전반적으로 이중판 폭 감소에 따른 강도의 감소를

보이고 있다. 하중-처짐 곡선 형태는 두 그룹으로 파악될 수 있으며 이는 이중판폭 12.5-50% 영역에서는 대각선 처짐성분을 조금 가지면서 최대 수직처짐이 판 중앙에서 발생하는 일반파 처짐 형태와 이중판폭 62.5- 87.5% 영역에서 최대처짐이 양쪽 측부에서 발생하는 3반파 처짐형상으로 구분될 수 있다. 그 한 예로 Fig. 3.6에 이중판폭이 판폭의 75%에 달하는 경우에 대한 처짐 형태를 제시하였다.

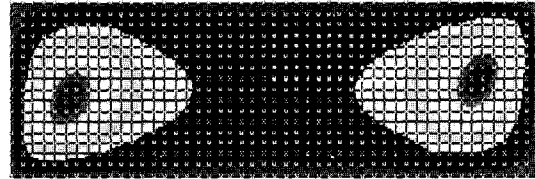


Fig. 3.6 Deformed contour of 75% doubler breadth model

### 3.4 이중판 길이의 영향

마지막으로 이중판 길이의 변화에 따른 판부재의 하중-처짐 거동을 살펴보기 위해 7단계의 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 3.7에 표시하였다.

이중판 길이/판부재길이를 표시하는,  $\frac{a_d}{a}$ 를 판길 12.5%부터 87.5%까지 12.5% 간격으로 총 7단계의 해석 결과를 나타내었다.

본 그림으로부터 하중-처짐 곡선은 처짐형태에 따라 크게 두가지 유형으로 구분 될 수 있으며 각 그룹 내에서 이중판길이 감소에 따른 강도와 초기 강성이 점차적인 감소를 보이고 있다.

하중-처짐 곡선의 한 그룹은 이중판길이 12.5-37.5% 영역으로 주된 처짐 형상은 3반파 유형으로 최대 수직처짐은 양쪽 측부에서 발생한다. 또한 그룹은 이중판 길이 50- 75% 영역으로 최대처짐이 판 중앙부에서 발생하는 1반파 처짐형상으로 구분될 수 있다. 그 한 예로 Fig. 3.8에 이중판길이가 이판길이의 12.5%에 달하는 경우에 대한 처짐 형태로 양측 반파에서 최대 수직처짐이 발생하고 있다.

이 때 이중판은 앞 단계(이중판 길이가 판길이

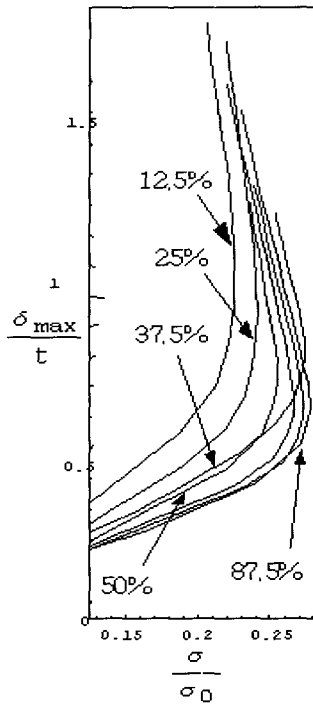


Fig. 3.7 Load-deflection curves according to the variation of doubler length

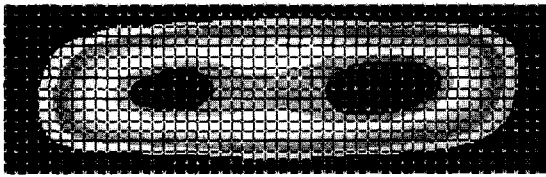


Fig 3.8 Deformed contour of 12.5% doubler length model

의 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 보인다. 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.

#### 4. 등가 평판 두께 산정

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 있는지를 살펴보기 위해 강도 변화치를 이중판이 없을 경우의 판부재 두께의 변화 정도로 검토하여 본다.

#### 4.1 수치해석을 통한 등가 평판 두께식의 도출

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 처짐값은 횡하중의 영향과 같은 형태로 포함시킬 수 있어 본 연구에서는 별도로 추가시키지 않았다.

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(4.1) 혹은 (4.2)으로 표시될 수 있다.

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_0} = 2.571 - 2.473\beta_F + 0.655\beta_F^2 \quad (4.1)$$

$$\beta_F = 2.441 - 3.664 \frac{\sigma_F}{\sigma_0} + 2.578 \left(\frac{\sigma_F}{\sigma_0}\right)^2 \quad (4.2)$$

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.

Table 4.1 Strength of equivalent flat plate

Slenderness ratio, $\beta_F$	$\sigma_F / \sigma_0$
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

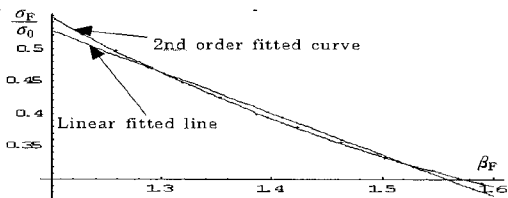


Fig. 4.1 Correlation curve of flat plate between slenderness ratio,  $\beta_F$  and normalized stress,  $\sigma_F/\sigma_0$ .

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 좌굴강도와의 상관관계를 검토하여 본다. 이를 위해 4.1절에서 수행한 등가평판의 강도에 따른 판두께 변화의 영향은 본인 등이 개발한 다음의 좌굴강도 식(4.3)을 이용하여 강도변화에 따른 두께변화를 검토하여 보았다(Paik et al. 1992, 함주혁/김을년 1997).

$$\Gamma_B = \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_{rex}}{\sigma_{xcr}} \right]^{a_1} + \left[ \frac{\sigma_y + \sigma_{rey}}{\sigma_{ycr}} \right]^{a_2} - \eta_a \leq 0 \quad (4.3)$$

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

$a_1 - a_4$  : 판의 가로-세로비(=a/b)와 폭-두께비(=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).

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

여기서,

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

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

$R_{\alpha x}$  : 판길이 방향의 횡수압의 영향을 나타내는 파라메타  
 $= (1 + \alpha Q)^{1/2}$   
 $\alpha = 0.025(a/b)^2 - 0.155(a/b) + 0.360$   
 ... for  $\sqrt{2} \leq a/b < 4$   
 $= 0.14$  ... 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).

$\sigma_{cr} = \sigma_E$  -----  $0.5 > \sigma_E/\sigma_0$  영역  
 $= \sigma_0 \{-0.0847(\sigma_E/\sigma_0)^4 + 0.5857(\sigma_E/\sigma_0)^3 - 1.5631(\sigma_E/\sigma_0)^2 + 2.0784(\sigma_E/\sigma_0) - 0.2164\}$  -----  $0.5 \leq \sigma_E/\sigma_0 < 1.9$  영역  
 (4.6)

여기서,

- $\sigma_{cr}$ : 일축압축력이 작용할 때의 임계 좌굴응력 (판길이 혹은 폭방향에 따라  $\sigma_{xcr}$  혹은  $\sigma_{ycr}$ )
- $\sigma_E$ : 일축압축력이 작용할 때의 Euler 탄성좌굴응력 (판길이 혹은 폭방향에 따라  $\sigma_{xE}$  혹은  $\sigma_{yE}$ )
- $\sigma_0$ : 항복 응력

상기의 좌굴강도식(4.4-4.6)과 추가적 수치해석을 통한 등가평판의 강도의 상관관계를 얻기 위해 수치해석에서 얻은 등가 평판강도에 상당하는 하중을 만족하는 세장비를 좌굴강도식을 이용하여 계산하였다.

각 좌굴하중,  $\sigma_B$ 의 경우의 최소 두께를 주는 세장비  $\beta_B$ 와의 관계를 Table 4.2에 정리하였다. 또한 이를 Fig. 4.1과 같은 좌표축 형태로 함께 표

현하면 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.

$\beta_F = \beta_B - 0.9328 + 7.6791 \frac{\sigma_B}{\sigma_0}$  (4.7)

Table 4.2 Correlation table between normalized buckling stress and slenderness ratio

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

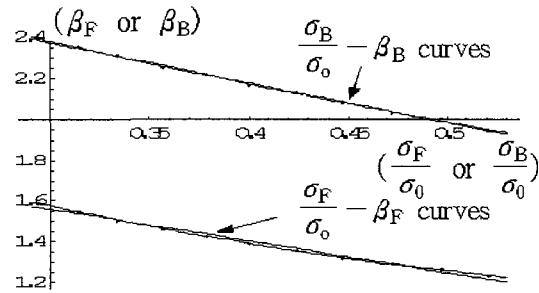


Fig. 4.2 Correlation curves between slenderness ratio and normalized stress

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 평가지침

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

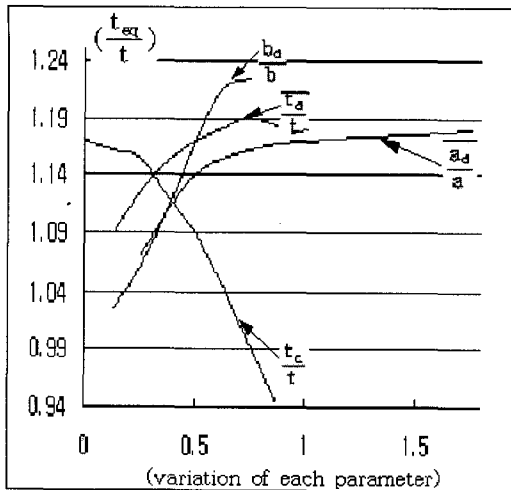


Fig. 5 Equivalent flat plate thickness curves according to the variation of each design parameter of doubler plate

( $\frac{t_d}{t}$ ), 주판 폭에 대한 이중판 폭( $\frac{b_d}{b}$ ) 그리고 주판두께에 대한 이중판 부식두께( $\frac{t_c}{t}$ ) 각각의 무차원화된 값을 나타내며 증축은 주판두께에 대한 등가 평판두께( $\frac{t_{eq}}{t}$ )의 무차원화된 값을 나타낸다. 본 그림으로부터 면내조합하중과 수압을 동시에 받는 이중판으로 보강된 비교적 세장한 직사각판에 대한 설계 및 강도평가 분석을 통해 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 본 해석의 경우 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( $b_d$ )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.

- 상기 그림으로부터 주판의 극심한 부식의 경우를 제외하면 무차원화된 등가 평판두께를 지시하는 3곡선, 즉 이중판 길이( $a_d$ ), 두께( $t_d$ ) 및 폭( $b_d$ )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 등가평판두께의 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.

### 7. 결론

이중판의 접착 효과를 고려하여 면내 복합하중과 수압하중을 동시에 받는 판부재의 강도평가를 실시하였다.

대표적인 선박 판부재를 대상으로 다양한 이들 하중이 동시에 작용하는 하중을 대상으로 이중판의 폭, 길이, 두께 및 주판(main plate)의 부식의 영향 등 각종 파라메타의 영향에 따른 이중판의 강도평가를 비선형 구조해석을 통해 분석하였다.

이중판 보강의 각종 파라메타에 따른 보강효과를 고찰하기 위해 등가평판의 강도해석을 수행하고 각 파라메타의 영향에 따른 강도변화를 비교 분석하였다.

이들 시리즈해석 결과를 바탕으로 본 작용하중에 따른 이중판의 강도평가식을 도출하였으며 저자가 기 개발한 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 등가평판두께로 제시하였고 이로부터 본 고려 하중의 경우 길이 및 두께의 이중판은 그 치수가 비교적 작은 경우에 급격한 강도의 증가를 보이거나 이를 제외하고는 강도의 완만한 상승을 보인다. 이중판 폭변화에 따른 등가두께의 변화는 직선적 변화를

보이고 있다. 주판의 부식이 큰 경우를 제외하면 각 파라메타 변화에 따른 등가 평판두께가 102%~123% 사이에 분포하고 있다고 볼 수 있어 면내 조함하중과 수압을 동시에 받는 경우의 이중 판은 일축 및 양축 면내압축의 경우에 비해 등가 두께 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 가로세로비와 세장비의 경우, 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

- 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 좌굴강도해석(제3보) -압축 및 전단좌굴-", 대한조선학회지, 제22권 제1호, pp. 9-20.
- 한국선급, 1999, 선급검사내규, 검사내규 30211, 3-2-12(Rev. 32, 37) - 3-2-19.
- 함주혁, 1998, 선박 이중판(doubler)의 강도에 관한 연구, '98(6차년도) 산학연 공동기술개발 지역컨소시엄 과제별 최종 보고서, pp. 51-91.
- 함주혁, 1999, "종방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도 평가", 1999년도 추계 학술대회 논문집, pp. 471-474.
- 함주혁, 2001, "양축방향 면내 압축하중을 받는 선박 이중판의 강도평가", 대한조선학회논문집, 제38권 제1호, pp. 72-85.
- 함주혁, 김을년, 1994, "건조중인 선박에서의 기관실 상갑판 판부재의 처짐 예측," 대한조선학회논문집, 제31권 제3호, pp. 119-128.
- 함주혁, 김을년, 1994, "선박선저외판의 좌굴특성에 관한 연구 - 보강재의 구속영향 검토 -, " 대한조선학회논문집, 제31권 제4호, pp. 130-138.
- 함주혁, 김을년, 1997, "선박판부재의 개선된 좌굴평가 시스템의 개발," 대한조선학회논문집, 제34권 제3호, pp. 53-60.
- 함주혁, 김을년, 정윤석, 1996, "면내인장력을 고려한 판부재의 좌굴강도 평가식 개발," 대한조선학회논문집, 제33권 제2호, pp. 111-118.
- Lee, S. H., 1990, MSC/NASTRAN Handbook for Nonlinear Analysis, Version 67(Draft).
- MacNeal-Schwendler co., 1999, MSC/NASTRAN for Windows, Release Guide Version 4.
- Paik, J. K., Ham, J. H. and Ko, J. H., 1992, "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.
- Paik, J. K., Ham, J. H. and Kim, U. N., 1992, "A New Plate Buckling Design Formula," J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 171, pp. 559-566.
- 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-", Technical Report of Mitsubishi Heavy Industries Co., Vol. 18, No. 3.



< 함 주 혁 >