

선체 유공보강판의 최종강도 거동에 관한 연구

고재용* · 이준교** · 박주신** · 배동균***

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수, **목포해양대학교 대학원(조선공학) ***(주)한국종합설계 기술이사

A Study on the Ultimate Strength Behavior for Ship Perforated Stiffened Plate

Jae-Yong Ko* · Jun-Kyo Lee** · Joo-Shin Park** · Dong-Kyun Bae***

* Faculty of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mopo, 530-729, Korea.

** Graduate school of Mokpo National Maritime University, Mopo, 530-729, Korea.

*** The Korea Consolidation Design Corporation, Technology director, Mokpo, Korea.

요 약 : 선체는 기본적으로 판부재들의 조합으로 구성되어 있으며 이들중 상당수는 유공판(Perforated plate)이다. 선체에 설치된 유공판으로서는 선체 상갑판 해치(하역시설로 사용), 선저부의 거더와 플로어(중량경감과 선박 건조 및 검사시 통로확보용), 다이어프램(중량경감 및 파이프 관통의 목적)등이 있다. 이들 유공판에 하중이 작용하면 좌굴과 최종강도 특성이 크게 변화할 뿐만 아니라 수반되는 면내응력도 재 분포하게 되어 심각한 강도문제를 야기 시킬 수 있다. 실적선에서는 유공주위에 스티프너 보강을 통하여 취약한 좌굴강도 보완하고 있으며, 유공을 고려한 최적의 유공보강판 모델을 적용한 좌굴강도 및 최종강도를 파악할 필요성이 대두시 되고 있다. 이와 같은 측면에서 각 조선소에서는 각국 선급들이 제시하는 유공판의 좌굴설계식을 사용하여 강도계산을 하고 있으나 임의의 유공크기에 대한 좌굴강도 및 최종강도 평가법을 찾기란 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 실선에서 사용중인 유공보강판의 모델을 조사하여 비선형유한요소법을 적용하여 면내 압축하중이 작용하는 경우에 대해서 유공의 크기와 웹 치수를 변화시켜가며, 최종강도 시리즈 해석을 수행하고 압축최종강도에 미치는 영향을 검토하였다.

핵심용어 : 유한요소법, 유공보강판, 최종강도, 호장중분법, 좌굴

Abstract : Ship have cutout inner bottom and girder and floor etc. Ship's structure is used much, and structure strength must be situated, but establish new concept when high stress interacts sometimes fatally the area. There is no big problem usually by aim of weight reduction, a person and change of freight, piping etc.. Because cutout's existence grow up in this place, and, elastic buckling strength by load causes large effect in ultimate strength. Therefore, stiffened perforated plate considering buckling strength and ultimate strength is one of important design criteria which must examine when decide structural concept at initial design.

Therefore, and, reasonable buckling strength about perforated stiffened plate need to ultimate strength limited design . Calculated ultimate strength varied several web height and cutout's dimension, and thickness in this investigated data. Used program(ANSYS) applied F.E.A code based on finite element method

Keywords : Finite Element Method, Perforated Stiffened Plate, Ultimate Strength, Arc-length method, Buckling

1. 서 론

선체는 기본적으로 판부재들의 조합으로 구성되어 있으며 이들중 상당수는 유공판(Perforated plate)이다. 선체에 설치된 유공판으로서는 선체 상갑판 해치(하역시설로 사용), 선저부의 거더와 플로어(중량경감과 선박 건조 및 검사시 통로확보용), 다이어프램(중량경감 및 파이프 관통의 목적)등이 있

다. 이들 유공판에 하중이 작용하면 좌굴과 최종강도 특성이 크게 변화할 뿐만 아니라 수반되는 면내응력도 재 분포하게 되어 심각한 강도문제를 야기 시킬 수 있다. 실적선에서는 유공주위에 스티프너 보강을 통하여 취약한 좌굴강도 보완하고 있으며, 유공을 고려한 최적의 유공보강판 모델을 적용한 좌굴강도 및 최종강도를 파악할 필요성이 대두시 되고 있다. 이와 같은 측면에서 각 조선소에서는 각국 선급들이 제시하는 유공판의 좌굴설계식을 사용하여 강도계산을 하고 있으나 임의의 유공크기에 대한 좌굴강도 및 최종강도 평가법을 찾기란 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 실선에서 사용중인 유공보강판의 모델을 조사하여 비선형유한요소법을 적용하여

* 정회원, kojy@mmu.ac.kr 016)655-7129

** 정회원, jklee96@mmu.ac.kr 061)240-7217

** 정회원, scv2434@mmu.ac.kr 010)4662-9326

** 정회원, kcdbcbae@hanmail.net 011)634-3317

면내 압축하중이 작용하는 경우에 대해서 유공의 크기와 웹 치수를 변화시켜가며, 최종강도 시리즈 해석을 수행하고 압축최종강도에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 수치 계산이론 및 해석 모델링

2.1 수치계산이론

본 연구논문에서는 실제 대형조선소에서 사용하고 있는 유공의 크기에 대하여 조사를 한 결과 각 조선소 마다 회사 실정에 맞게 표준적인 유공모델이 자주 사용됨을 알 수가 있었다. 특히 유공의 크기는 유공의 용도에 따라 크게 분류가 되었으며 같은 선종이라도 선박의 재화중량별로 차이를 부여하여 조사를 하였다.

(1) 600×800mm 구멍을 가진 유공판의 실적선 자료

선 종	판 두께(t)	종횡비(a/b)	유공비(d/b)
110K C.O.T	13mm	4.42	0.72
105K C.O.T	13mm	2.77	0.72
153K C.O.T	12mm	4.74	0.69
309K VLCC	18mm	4.85	0.51
318K VLCC	19mm	3.07	0.62
170K B/C	14mm	2.94	0.58

(2) 500×700mm 구멍을 가진 유공판의 실적선 자료

선 종	판 두께(t)	종횡비(a/b)	유공비(d/b)
153K C.O.T	12mm	4.74	0.36
6800 TEU	16mm	2.38	0.60
105K C.O.T	13mm	2.77	0.60
172K B/C	16mm	4.30	0.88
170K B/C	13mm	2.85	0.59
5000 TEU	12mm	2.14	0.59
318K VLCC	19mm	3.07	0.51

(3) 400×600mm 구멍을 가진 유공판의 실적선 자료

선 종	판 두께(t)	종횡비(a/b)	유공비(d/b)
105K C.O.T	13mm	4.42	0.36
160K C.O.T	12mm	5.10	0.36
300K C.O.T	20mm	4.85	0.26

본 연구에서는 실적선에서 사용하고 있는 유공의 크기에 대한 조사와 함께 사용부위 그리고 용도에 대해서 조사한 결

과 다음의 3가지 형태로 요약할 수가 있다. 유공의 크기가 600×800mm 와 500×700mm인 구멍을 가진 유공판의 주 용도는 사람의 이동통로(Access hole)이었으며, 400×600mm에서는 선체 중량경감(Lightening hole)이 주 용도로 사용되고 있다.

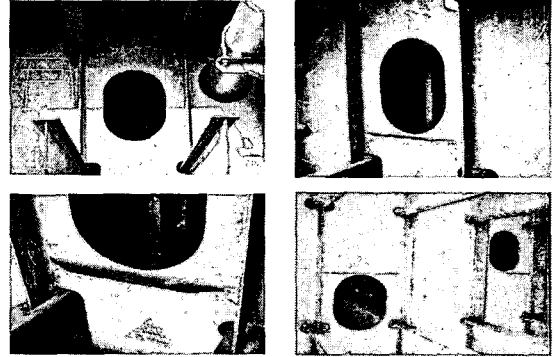


Fig.1 A varying type of stiffened flat bar at the perforated plate

Fig.1에서는 컨테이션(6730TEU)의 이중저구조에 사용되고 있는 유공판에서 유공주위의 좌굴강도를 보강해주기 위하여 flat-bar stiffener를 유공주위에 부착한 모습을 보여주고 있다. 기본적인 초기구조설계 단계에서는 유공주위를 보강하지는 않지만 탑재나 블릭간 이동 중에 발생하게 되는 여러 가지 변형에 의해 유공주위를 보강하는 형태와 구조해석을 통하여 유공주위의 보강여부를 결정하게 된다. 유공주위의 보강형태로서는 크게 스티프너 보강과 유공주위의 doubler보강 그리고 Spigot이 있다. 이들 중에서 현재 가장 많이 쓰이는 방법은 스티프너(stiffener) 보강으로서 보강효과가 가장 좋으며, 시공 상 편리하여 유공주위보강의 대부분의 형태를 이루고 있다.

본 논문에서는 중앙에 타원형 유공을 가진 유공보강판을 대상으로 유공판의 유공의 크기, 종횡비 및 두께를 변화시켜가며 탄소성 대변형 유한요소 시리즈해석을 수행하였으며, Fig.3에서 사용된 유한요소모델을 나타내고 있다. 사용된 주요치수 및 재료 물성치는 다음과 같다.

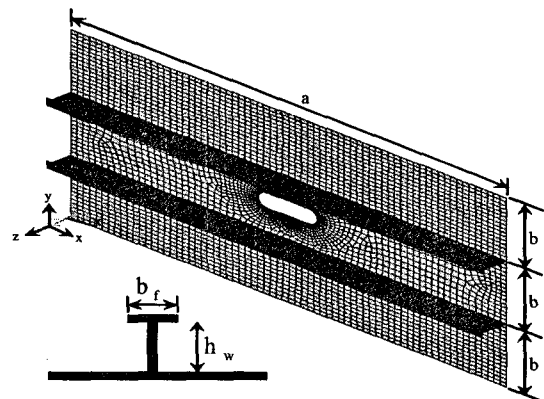


Fig.3 FEA Model of stiffened plate with cutout

판길이(a)=4500mm, 판폭(b)=840mm, 판두께(t)=12, 15mm, 웹두께(tw)=12, 15mm, 플랜지두께(ft)=12, 15mm, 플랜지폭(fb)=120mm, 포아송비(v)=0.3, 탄성계수(E)=205.8GPa, 항복응력(σ_y)=352.8MPa 이다.

하중성분은 판 길이방향 압축하중을 대상으로 하였다. 판재에 존재하는 초기결함은 초기치짐 형태로 치환하여 적용하였다(Smith's initial deflection formula의 Average level- $0.1 \times \beta^2 \times t$)크기로 적용하였고, 용접잔류응력에 대해서는 고려하지 않았다.

유공판의 내변에서는 회전속이 없는 단순지지 경계조건을 설정하였으며, 실제 판 구조물을 구성한 판 부재는 주변에서 주위의 다른 판 부재와 연결되어 있는 연속적인 구조물을 이루고 있기 때문에 내변에서는 면내방향으로의 변위를 구속하며, 직선을 유지시켰다. 이러한 이상화는 실제로 많이 사용되어지고 있으며, 다소 보수적이지만 충분히 합리적인 결과를 준다고 알려져 있다. 비선형 좌굴해석기법으로는 Arc-length method를 적용하여 최종강도 이후의 거동을 파악하는 데 있어서 정확성을 기하였다.

2.2 유공보강판의 최종강도

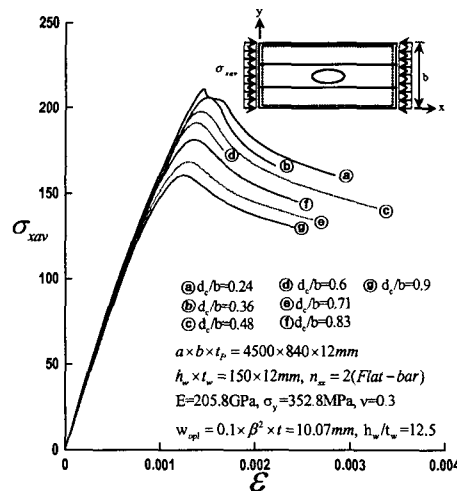
최종한계상태설계의 구조설계 기준은 소성분괴 내지는 최종강도를 기준으로 하고 있다. 과거 선박들의 구조설계는 최종강도에 대한 고려 없이 단지 부재들의 탄성좌굴강도나 이를 소성 수정한 임계좌굴강도 계산 값들만을 기준으로 설계하였으며, 부재들의 좌굴 후 거동에 대해서는 고려하지 않은 안전율을 반영한 설계가 대부분이었다. 하지만, 이러한 설계는 경량적인 안전율을 결정하기 힘들며, 단지 경험에 의해서 결정되는 경우가 많다. 그렇기 때문에 최종강도에 대한 계산은 반드시 필요하며, 최근에는 육상에서 쓰이는 강구조물이나 해상구조물 뿐만 아니라 선박등의 구조설계에서도 최종강도를 기준으로 설계를 수행하고 있다.

2.3 종방향 압축하중이 작용하는 유공보강판의 최종강도 해석

중횡비, cutout의 크기, 세장비, 보강재의 단면형태를 변화 시키가며 범용유한요소 프로그램인 ANSYS 9.0을 사용하여 종방향 압축하중이 작용하는 유공판에 대한 최종강도 시리즈 해석을 수행하였다. cutout의 크기비는 0.24-0.83에 대해서 해석을 수행하였으며, 판두께와 보강재의 두께를 12mm, 15mm를 적용하였으며, 보강재의 웹높이는 150-300mm의 범위로 50mm를 주간격으로 설정하였다.

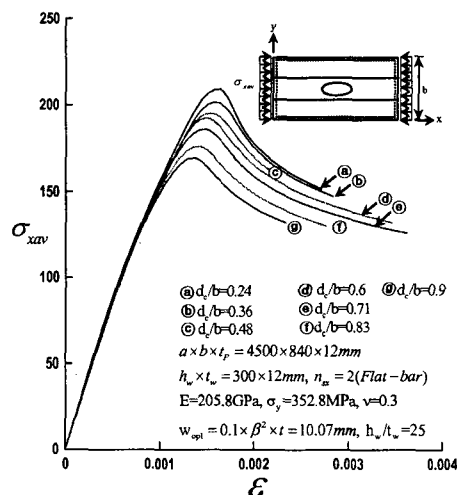
Fig.3에서는 flat-bar형태의 보강재를 적용한 유공지름이 800mm인 유공보강판에서의 보강재의 높이를 150과 300mm인 경우에 대해서 유공비에 따른 탄소성대변형 거동결과를 응력-변형률 관계로 나타내고 있다. flat-bar 보강재를 사용한 해석에서는 (a)의 경우에 비해 (b)의 경우에 단면계수가

증가하였음에도 불구하고 압축최종강도 차이는 크게 나타나



(a) $h_w/t_w = 12.5$

Fig.3 Comparison of compressive stress-strain curves varying the cutout ratio with Flat-bar stiffener for cutout diameter 800 series.



(b) $h_w/t_w = 25$

Fig.3 Comparison of compressive stress-strain curves varying the cutout ratio with Flat-bar stiffener for cutout diameter 800 series.

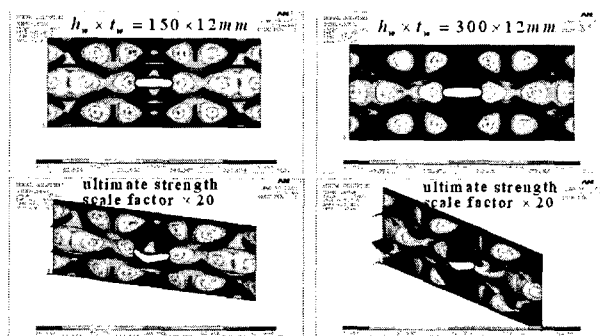
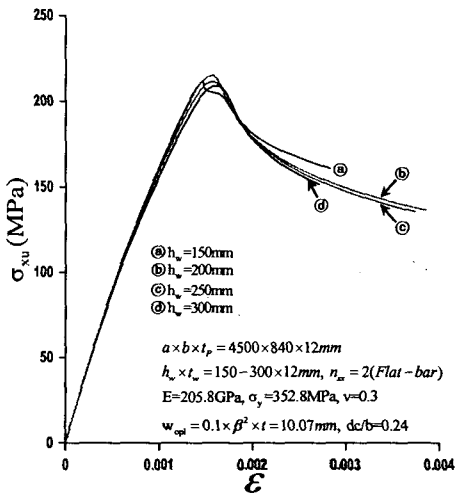


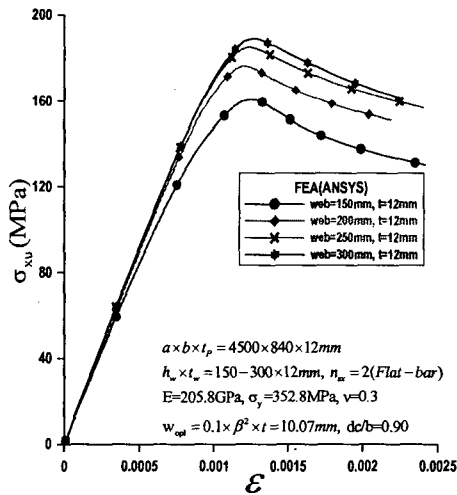
Fig.4 Comparison of deflection mode on the ultimate strength point varying web height with Flat-bar

stiffener for cutout diameter 800 series.

지 않고 있다. 이는 flat-bar 보강재가 압축하중이 점진적으로 증가함에 따라 웹에서의 비틀림에 의한 트리핑(Tripping) 거동이 발생하여 상대적으로 최종강도를 낮게 평가하는 것으로 판단된다. 이와같은 현상은 fig.4에서 잘 비교해주고 있다. 유공비는 0.24이고 웹의 두께는 12mm로 고정하고 웹의 높이를 변수로 하여 각각 150, 300mm일 경우의 해석결과에 대해서 비교하고 있다. 전자인 경우에도 web local buckling & web tripping 거동에 의해서 붕괴하나, 단면계수값이 상대적으로 증가한 경우에는 web tripping 거동에 의해서 붕괴하는 양상을 나타내고 있다.



(a) $d_c/b=0.24$



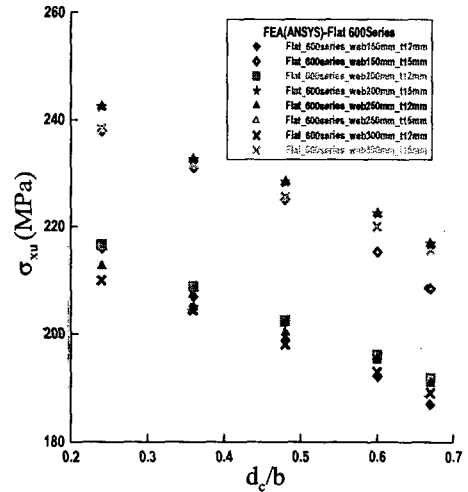
(b) $d_c/b=0.90$

Fig.5 Comparison of compressive stress-strain curves varying web height according to cutout ratio with Flat-bar stiffener for cutout diameter 800 series.

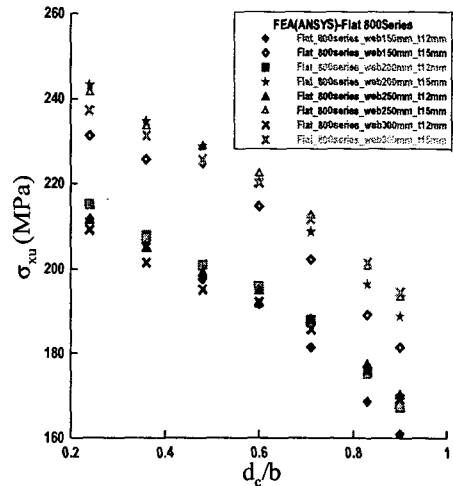
그러나, fig.5에서 나타내듯이 유공비가 점점 증가하게 되면 웹의 단면계수가 클수록 압축최종강도는 크게 나타나고 있다. 종방향 압축하중이 작용하게 되면, 유공의 크기가 증가할수록 유공주위에서 급격한 응력집중이 발생하게 되고, 하

중의 점진적인 증가와 함께 소성항복영역이 보강재방향으로 확산되게 된다. 이때, 보강재주변에서 최소전단면이 소성항복하면서 이 상태에서 곧바로 최종강도에 이르는 거동을 보이기 때문에 유공비가 0.90에서는 이와 같이 보강재의 단면계수가 클수록 최종강도는 상대적으로 높게 평가하게 된다.

Fig.6에서는 flat-bar 형태의 보강재단면을 사용한 해석에서 유공사이즈가 600과 800의 결과를 비교하고 있다. 판두께와 웹두께 즉 세장비의 영향에 따라서 압축최종강도는 구분되어지고 있으며, 유공의 지름의 크기에 큰 영향을 받지 않고 있다. 실제 유공이 존재하는 frame 사이에는 보강재가 위치하며 인접한 frame에서는 무공판이 존재하고 있다. 따라서 평판에서의 유공에 따른 최종강도 분포는 유공비에 큰 영향을 받게 되지만, 유공보강판에서는 그 영향이 상대적으로 작게 된다.

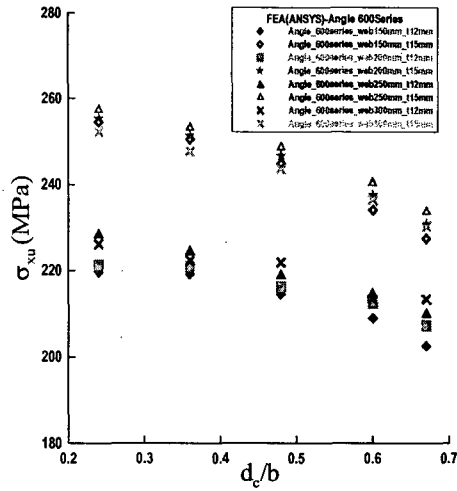


(a) 600 series

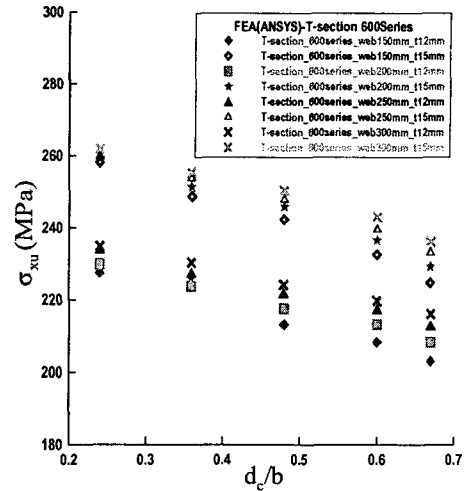


(b) 800 series

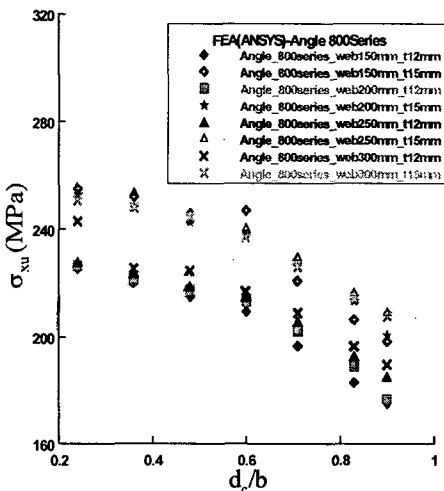
Fig.6 Comparison of compressive stress-cutout ratio curves varying the web height and thickness with flat-bar stiffener for cutout diameter 600 and 800 series.



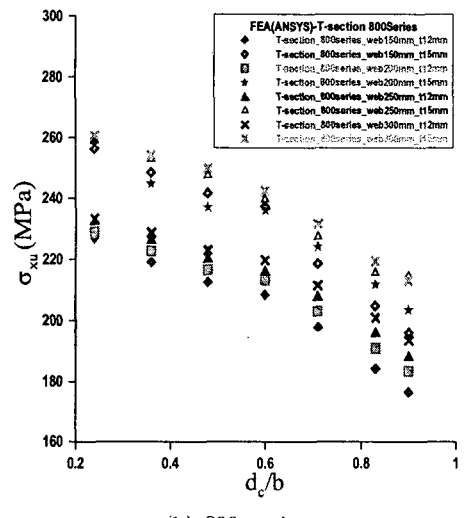
(a) 600 series



(a) 600 series



(b) 800 series



(b) 800 series

Fig.7 Comparison of compressive stress-cutout ratio curves varying the web height and thickness with Angle-bar stiffener for cutout diameter 600 and 800 series.

Fig.8 Comparison of compressive stress-cutout ratio curves varying the web height and thickness with Tee-bar stiffener for cutout diameter 600 and 800 series.

Fig.7에서는 유공지름이 600인 경우와 800인 경우의 웹 두께와 웹 높이를 달리한 시리즈 해석을 응력-유공비로 조합하여 나타내고 있다. flat-bar에 비해서 flange의 비틀림강성 보강역활로 인하여 압축최종강도는 상대적으로 높게 평가되고 있으며, 유공비가 0.7이상에서는 최종강도 감소가 크게 나타나고 있다. 보강재의 높이가 150mm이고 웹두께가 15mm인 경우에는 유공비의 증가와 함께 최종강도 변화가 급격하게 나타나고 있다.

마지막으로 fig.8에서는 Tee-bar 보강재를 가진 유공보강판의 유공지름이 600과 800인 경우에 대해서 응력-유공비로 나타내고 있다. angle-bar에 비해서는 좀더 높은 최종강도 분포를 나타내지만 flange가 있는 형태에서는 큰 차이를 보이지 않으며 유공비가 0.7이상에서는 fig.8에서와 같이 최종강도가 급격히 감소하는 거동을 보이고 있다.

4. 결론

유공판은 중량경감, 사람 및 화물의 이동, 배관등 다양한 목적으로 선박에 많이 사용되고 있으며, 유공주위의 좌굴강도를 보강하기 위하여 보강재가 위치하게 된다. 본 논문에서는 선박에 실제 사용되어지는 유공보강판 모델을 기준으로 세장비, 유공비의 크기를 변화하여 탄소성대변형 유한요소 해석을 통해 종방향 압축하중에 대하여 최종강도 거동을 분석하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 하여 차후 유공보강판의 최종강도를 기준으로 한 설계식 개발이 필요시 되고 있다.

(1) 실적선의 정원형 유공보강판 모델은 종방향 스티프너의 보강역활로 인하여 유공비가 증가하더라도 최종강도 감소 비율은 크지 않다.

(2) 플랜지의 역할로 인하여 트리핑거동이 상당히 제어가 되며, 최종강도 또한 높게 평가된다.

(3) 유공의 비가 0.7이상에서는 유공주위의 최소단면이 조기항복하여 전단면 항복으로 전개되며 최종강도 감소가 크게 나타난다.

참 고 문 헌

- [1]. 박주신 : 선체판의 2차좌굴을 고려한 비선형거동에 관한 연구, 공학석사학위논문, 2004. 2.
- [2]. J.K. Paik, J.H. Ham and E.N. Kim : A new plate buckling design formula, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, 1992, pp.559-556.
- [3]. J.K. Paik, J.H. Ham and Jae H. Ko : A new plate buckling design formula(2nd Report) - On the plasticity correction - J. of the society of naval architects of Japan, Vol.172, 1992.
- [4]. J.H. Ham and Oi Hyun Kim. " Buckling Strength Evaluation System ", Meeting of Korea Ship Structure Congress, Sep, 1991.
- [5]. Tetsuya Yao and Chikahisa Murakami : Buckling / Ultimate Strength of Perporated Rectangular Plate under Thrust, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, 2001, pp.731-737.