

압축하중을 받는 유공보강판 구조의 최종강도 설계식 개발

† 박주신* · 고재용** · 이경환***

* 오사카대학원 선박해양공학과 박사과정, **목포해양대학교 해양시스템공학부 교수
***중소조선연구원

Development of Designed Formulae for Predicting Ultimate Strength of the Perforated Stiffened Plate subjected to Axial Compressive Loading

† Joo-Shin Park* · Jae-Yong Ko** · Kyung-Hwan Lee***

* Graduate school of Engineering, Osaka University, Suita, 565-0834, Japan

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

*** Research institute of Medium & Small Shipbuilding, Mokpo, 530-729, Korea.

요 약 : 선체는 기본적으로 얇은 판부재들의 조합으로 구성되어 있으며 이들 중 상당수는 유공을 가진 유공판(Perforated plate)으로 이루어져 있다. 선체에 설치된 유공판으로서는 선체 상갑판 해치(하역시설로 사용), 선저부의 거더와 플로어(중량경감과 선박 건조 및 검사시 통로 확보용), 다이어프램(중량경감 및 파이프 관통의 목적)등이 있다. 이들 유공판에 압축하중이 작용하면 좌굴과 최종강도 특성이 크게 변화할 뿐만 아니라 수반되는 면내응력도 재 분포하게 되어 심각한 문제를 발생한다.

본 연구에서는 실선에서 사용 중인 유공보강판의 모델을 조사하여 비선형 유한요소법(ANSYS)을 사용하여 종방향 압축하중이 작용하는 경우에 대해서 유공비, 웹 치수, 웹 두께 그리고 보강재 단면을 변화시켜가며, 최종강도 시리즈 해석을 수행하고, 최종강도 예측 설계식을 제안하였으며, 식의 정도성을 검증하기 위하여 유한요소해석 결과와 비교하여 정도를 확인 하였다. 제안된 설계식은 초기구조설계 시 유공보강판의 최종강도 계산에 유용하게 사용되리라 판단된다.

핵심어 : 유공판, 유공보강판, 최종강도, 유공비, 좌굴, 면내응력

Abstract : Ship structures are thin-walled structures and lots of cutouts, for example, at inner bottom structure, girder, upper deck hatch, floor and dia-frame etc. In the case where a plate has a cutout it experiences reduced buckling and ultimate strength and at the same time the in-plane stress under compressive load produced by hull girder bending will be redistributed.

In the present paper, we investigated several kinds of perforated stiffened model from actual ship structure and series of elasto-plastic large deflection analyses were performed to investigate into the influence of perforation on the buckling and ultimate strength of the perforated stiffened plate varying the cutout ratio, web height, thickness and type of cross-section by commercial FEA program(ANSYS). Closed-form formulas for predicting the ultimate strength of the perforated stiffened plate are empirically derived by curve fitting based on the Finite Element Analysis results. These formulas are used to evaluate the ultimate strength, which showed good correlations with FEM results. These results will be useful for evaluating the ultimate strength of the perforated stiffened plate in the preliminary design.

Key words : Perforated Plate, Perforated Stiffened Plate, Ultimate Strength, Cutout ratio, Buckling, In-plane Stress

1. 서 론

선체는 기본적으로 판부재의 조합인 상자형 박스구조물로 구성되어 있으며 이들 중 상당수는 유공을 지니고 있는 유공판구조를 나타내고 있으며, 이러한 유공이 존재함으로써 감소하게 되는 좌굴강도를 보완하기 위하여 유공판 주위에는 보강용 판부재가 위치하게 된다. 이들 유공 보강판에 압축하중이 작용하면 유공이 존재함으로써 무공 보강판의 좌굴과 최종

강도 특성과 비교하여 크게 다를 뿐만 아니라 수반되는 면내응력도 재 분포하게 되어 심각한 강도문제를 야기 시킬 수 있다 박주신(2004). 실적 상선에서는 유공주위에 스티프너(stiffener) 보강을 통하여 취약한 좌굴강도를 보완하고 있으며, 유공이 존재하면서 감소하게 되는 좌굴강도 및 최종강도와 함께 붕괴거동을 정확하게 예측하고, 유공의 존재에 대한 강도감소에 대해서 구조설계에 반영되어야 할 필요성이 있다. 이와 같은 측면에서 각 조선소에서는 각종 선급들이 제시하

† 교신저자 : 박주신(정회원), Joo_Shin_Park@naoe.eng.osaka-u.ac.jp 090)1153-9326
** 정회원, kojy@mmu.ac.kr, 061)240-7129
*** 정회원, khlee@rims.re.kr, 016)274-1572

는 유공판의 좌굴설계식을 사용하여 강도계산을 하고 있으나 보강판 구조에서 임의의 유공크기에 대한 좌굴강도 및 최종강도 평가법을 찾기란 매우 어려운 일이다 박주신(2006). 현재의 각 선급협회에서는 유공판의 좌굴강도 설계기준을 독자적으로 제시하고 있으며, 실제 선박에서 사용되는 유공보강판 모델과는 차이가 있다. 즉, 실제의 선박에서는 유공이 존재함으로써 취약하기 쉬운 좌굴강도를 보완하기 위하여 유공주위로 종방향 보강재를 설치하며, 보강재 사이로 무공판이 위치하는 형태를 나타내고 있다. 그러나, 각 선급에서 제시하는 설계기준에는 이러한 형태의 모델에 대해서는 고려가 되어 있지 않다. 바꾸어 말하자면, 보강재와 보강재 사이의 판에 유공이 존재하는 기본적인 모델에 대해서만 좌굴강도를 평가하기 때문에, 상대적으로 실제의 구조모델보다 좌굴강도 및 최종강도를 낮게 평가하게 된다.

본 논문에서는 실선에서 사용 중인 표준적인 유공 보강판의 모델을 조사하여 해석 표준 모델을 결정하였고, 탄소성대변형 유한요소 해석을 적용하여 면내 압축하중이 작용하는 조건에 대한 여러 가지 변수들의 영향을 고려하면서 시리즈계산을 수행하고, 이러한 결과를 바탕으로 하여, 최종한계상태설계법(Ultimate Limit State Design)에 기반을 둔 압축최종강도 평가 설계식을 경험적으로 도출하였다.

1.1 연구의 연혁

Minoru et al.(2001)은 면내하중(압축하중, 전단하중)이 작용하는 유공판에 대한 유공판의 좌굴감쇄계수를 도출하여, 좌굴 및 압축최종강도 설계식에 이 계수의 영향을 고려하여 제안하였다.

Tetsuya Yao et al.(2001)은 종방향 압축하중과 조합하중이 작용하는 경우의 유공판에 대한 좌굴 및 압축최종강도 특성을 분석하였으며, 각 하중에 대한 설계식을 제안하였다.

전민정 등(2001) 선체유공판의 좌굴 및 최종강도 설계식의 개발에 관하여 연구하였다. 이때 종방향 압축하중과 횡방향 압축하중 및 전단하중에 대한 설계식을 제안하였으며, 조합하중에 대해서도 고려하고 있다.

심종원(2005)은 압축하중이 작용하는 유공보강판에서의 최종강도 거동 특성에 대해서 연구하였으며, 기존에 개발된 경험식과 선급기준 및 유한요소해석 결과를 비교 평가 하였다.

1.2 최근의 구조강도 평가 동향 및 최종한계상태설계법

최종한계상태설계법(Ultimate Limit State Design) 소성붕괴 내지는 극한강도를 기준으로 하고 있으며, 과거 선박들의 구조설계는 극한강도에 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 정량적인 안전율을 결정하기 힘들며, 단지 경험에 의해서 결정되는 경우가 많다. Paik et al.(1992) 그러나, 선박의 운항 중 발생할 수 있는 각종 불확실한 하중조건 및

외부 환경조건에 대한 선박 구조물의 강도평가 시 보다 명확하고, 합리적인 구조평가 기준이 필요성이 제시되어, 최종강도 평가에 대한 변화가 이루어지고 있다. 최근에 국제선급협회모임(IACS)에서는 2006년 4월부터 통일구조규칙(Common Structural Rule)을 발효하여 현재 시행중이다. 이 중 한가지는 JTP(Joint Tanker Project)이고, 선박의 길이가 150m가 넘는 이중선체유조선에 적용하게 되도록 발효 중이며, LR, ABS, DnV에서 주도하고 있다. 다른 공통규칙으로는 JBP(Joint Bulker Project)이며, 길이가 90m이상의 산적화물선에 적용되며, 참여 선급은 BV, CCS, GL, KR, NK, RINA & RS이다. 이 두가지의 공통규칙은 차후 건조되는 유조선 및 산적화물선은 모두 이 규칙에 준하여 설계가 이루어져야 하는 강제규정으로서, 2006년 4월부터 시행 중에 있다. 해당설계개념은 선박의 종강도를 예로 들자면, 종강도 설계를 예전과 같은 방법을 사용하여 설계하며, 특정한 기준을 넘는 부위에서는 최종강도 해석을 별도로 수행할 것을 강제 규정으로 하고 있다. 아직까지는 최종한계상태설계법을 선박의 전체에 적용하기에는 한계가 있지만, 이미 최종한계상태설계 개념이 보편화 되고 있다. 국제해사기구(IMO)에서는 신개념선박구조기준(Goal-Based New Ship Construction Standards)을 도입추진 중에 있다. 이 선박구조기준은 안전기준에 따라 선박을 건조하던 종래의 방식과는 다르게 선박을 일정기간(25년) 운항하겠다는 목표를 기준으로 선박의 설계기준을 정하기 위하여 위 기관에서 2010년까지 전 세계 강제시행을 목표로 하고 있다. 선박의 구조강도 평가 및 설계에 대한 파급효과로서, 선박의 강도평가 시 최종강도를 기준으로 한 설계법으로 변화하기 시작하였으며, 현재 여러 가지 방면으로 검토 중이다.

2. 유공보강판 해석모델

2.1 주요치수의 조사

본 연구논문에서는 실제 대형상선에서 사용하고 있는 유공보강판의 크기에 대하여 조사를 한 결과 각 조선소 마다 회사 실정에 맞게 표준적인 유공모델을 주로 사용하고 있음을 알 수가 있었다. 특히 유공의 크기는 유공의 용도에 따라 크게 3가지로 분류 되었으며, 박주신(2006) 같은 선종이라도 선박의 재화중량별로 차이를 부여하여 조사한 결과를 Table 1~Table 3에 나타내고 있다.

Table 1 Investigated data of access hole (600×800mm)

선종	판 두께(t)	중형비(a/b)	유공비(d_c/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

Table 2 Investigated data of access hole (500×700mm)

선 종	판 두께(t)	종횡비(a/b)	유공비(d_c/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

Table 3 Investigated data of lightening hole(400×600mm)

선 종	판 두께(t)	종횡비(a/b)	유공비(d_c/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

실적 상선에서 사용하고 있는 유공 보강판의 치수에 대한 조사와 함께 사용부위 그리고 용도에 대해서 조사한 결과 다음의 3가지 형태로 요약할 수가 있다. 유공의 크기가 600×800mm 와 500×700mm인 개구부를 가진 유공판의 주 용도는 사람의 이동통로(access hole)로 사용되고 있으며, 400×600mm 크기에서는 선체 중량경감(lightening hole)이 주 용도로 사용되어지고 있다.

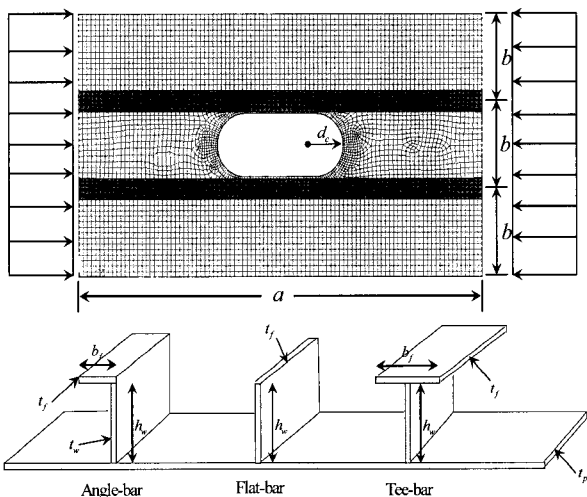


Fig. 2 Schematic model of stiffened plate with cutout

해석에 사용된 유한요소해석 모델을 Fig. 2에서 간략하게 나타내고 있으며, 해석대상 모델은 중앙에 타원형 유공과 유공주위 보강을 위한 2개의 종방향 보강재를 포함한 구조물로서, 시리즈해석 전에 메쉬 개수의 변화를 통한 검증은 통하여 웹의 메쉬는 8개, 플랜지는 4개, 판폭은 14개 씩 길이에 비례적으로 적용하였고, 총 메쉬 개수가 5,500개부터 일정한 최종

강도 값을 나타내어, 시리즈해석에는 위의 메쉬 개수를 전체 해석에 적용하였다 박주신(2006). 특히, 보강재 웹과 플랜지의 메쉬수(mesh number)가 위 해석에서 고려한 개수보다 적은 경우에는 좌굴에 의한 처짐형상을 표현하는데 한계가 존재하여, 불필요한 응력 집중현상이 발생하게 되어, 해석결과를 오관할 수 있으므로, 주의해야만 한다.

해석에서 고려하고 있는 경계조건은 유공판의 네변에서는 회전구속이 없는 단순지지 조건($u_z=0$)을 설정하였으며, 실제 판 구조물을 구성한 판 부재는 주변에서 주위의 다른 판 부재와 연결되어 있는 연속적인 구조물을 이루고 있기 때문에 네변에서는 면내방향으로의 변위를 구속하며, 최종강도에 도달할 때까지 네변 모두 직선을 유지시켰다. 이러한 이상화는 실제로 많이 사용되어지고 있으며, 다소 보수적이지만 충분히 합리적인 결과를 준다고 알려져 있다. Paik et al.(1992) 비선형 좌굴해석기법으로서는 특이점에서 발생하게 불완전한 천이 거동(snap-through or snap-back)을 수치적으로 정확하게 추적하기 위하여 비선형 좌굴해석기법 중 한가지인 Arc-length method를 사용하였다. 이 해석방법은 증분변수로서 하중과 처짐 곡선의 호(arc)의 반지름을 적용하며, 수렴계산의 전단계의 호의 반지름을 방향과 직각방향에 해를 탐색하며, 일반적인 뉴턴 램슨 방법에 의한 해 탐색 시 분기점에서의 거동을 추적하지 못하는 단점을 극복할 수가 있다 ANSYS(2000).

2.2 유한요소해석 모델링 및 메쉬 스테디

본 논문에서는 실선에서 조사된 다양한 형태의 유공보강판 모델에서 중앙에 타원형 개구부를 가지고, 유공주위의 강도감소를 보강하기 위한 보강재와 보강재를 사이로 무공판이 존재하는 영역을 표준 해석모델로 선정하였다. 유공판의 유공의 크기(d_c/b), 웹 높이(h_w), 웹 두께(t_w) 및 판 두께(t)를 주요 변수로 하여 탄소성대변형 유한요소 시리즈해석을 수행하고, 유공 보강판의 좌굴거동 및 압축최종강도 거동에 있어서 고려한 변수들의 영향과 가장 중요한 변수인 유공비의 증가에 따른 구조물의 좌굴 및 소성항복을 동반한 붕괴거동을 해석하였다. 해석에 사용된 주요치수 및 재료 물성치는 Table 4와 같다.

Table 4 material property

고장력강(AH32) 재료의 물성치	
탄성계수(E)	205.8GPa
항복응력(σ_y)	352.8MPa
포아송비(ν)	0.3
판 길이(a)	4500mm
판 폭(b)	840mm
판 두께(t_p)	12, 15mm
웹 두께(t_w)	12, 15mm
웹 길이(h_w)	150-300mm
플랜지 폭(b_f)	70, 120mm

하중성분은 선박의 황천 항해 시 호깅(hogging)조건에 의해서 발생하는 중 굽힘으로 인해 파생되는 압축하중(항복응력×부재의 두께)을 판 길이방향으로 작용시켰으며, 용접이나 절단 등의 열 가공에 의해서 필연적으로 발생하게 되는 초기결함(initial imperfection)의 효과를 초기변형량으로 가정하고, 각 부재마다 별도의 초기 처짐식을 고려하였으며, Fig. 3에 나타내고 있다. 즉, 판에서의 초기처짐(w_{opi})은 고유치좌굴해석을 통하여 얻은 좌굴모드형상에 스미스식의 중간 값(Smith's initial deflection formula, Average level- $0.1 \times \beta^2 \times t$)을 보강재 사이의 판의 처짐량으로 고려하고, 보강재의 길이방향 처짐량(w_{os})은 $0.0025 \times a$ 로 정의하였다. 여기서, 세장비를 나타내는 β 는 $\beta = (b/t) \times \sqrt{(\sigma_y/E)}$ 로 표현된다.

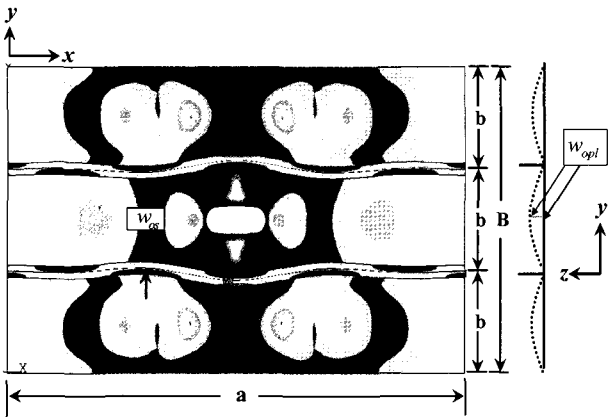


Fig. 3 Initial imperfection on the perforated stiffened plate

2.3 해석이론

본 논문의 비선형좌굴 유한요소시리즈해석은 기하학적 비선형성과 재료의 비선형성을 동시에 고려하고 있으며, 복잡한 비선형 거동의 한가지인 2차좌굴(secondary buckling)거동의 경로추적을 위하여, 수정된 뉴턴랩슨 방법과 Arc-length방법을 혼용하여, 미리 설정된 부구간마다 수렴기준 평가를 하도록 설정 하였다 박주신(2006). 해석에서 고려된 재료는 완전탄소성체로 고려하였으며, 소성의 영향은 등방성경화(bilinear isotropic hardening)거동을 고려하였다. 실제 유공보강판 실험에서 구해진 응력-변형률 곡선의 기울기에 대한 정보가 없기 때문에, 본 연구에서는 소성영역에서의 접선강성계수의 값을 지정하지 않았다. 이러한 해석기법은 아주 보수적인 관점의 평가이며, 실제 실험정보가 없는 경우 유용하게 사용될 수 있다. 증분해석 과정마다 각 요소의 항복평가(yielding evaluation)는 본 미세스(von-Mises)이론을 적용하여 평가하였다.

3. 최종강도 유한요소 시리즈해석

실적선에서 조사한 3가지 형태의 유공지름(600, 700,

800mm) 각각에 대해서 설계변수는 유공의 크기, 세장비 및 보강재의 단면속성을 고려하였다. 해석대상 모델에 대한 비선형좌굴 해석을 하기 위하여, 상용유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS Multiphysics V.10을 사용하였으며, 해석에 사용된 유한요소는 노드마다 6자유도를 갖고 있는 4절점 쉘(shell) 요소를 적용하였으며, 판 및 보강재의 모델링 시 동일한 요소를 사용하였다. 유공비의 크기비는 0.24~0.83에 대해서 고려하였으며, 판 두께와 보강재의 두께를 12mm, 15mm를 적용하고, 보강재의 웹 높이는 150~300mm의 범위로 50mm씩 변화를 주었다.

3.1 유공의 지름에 따른 극한강도 분포

유공의 최대 지름이 600mm인 조건에서의 설계변수를 고려한 해석결과를 평균응력과 유공비의 관계로 Fig. 4에서 나타내고 있으며, 크게 보강재의 단면속성 별로 분류하고 있다.

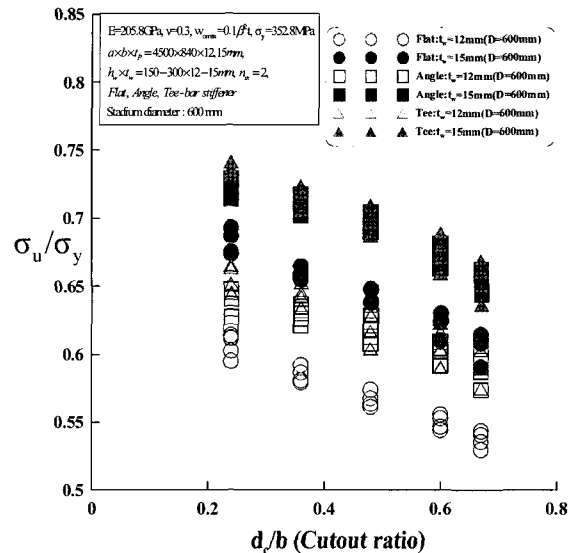


Fig. 4 Comparison of average stress and cutout ratio of the perforated stiffened plate with a diameter 600mm cutout.

3가지 형태의 보강재 단면속성을 고려한 비선형좌굴 해석에서는 웹의 단면계수가 증가 할수록 압축최종강도는 높게 평가하고 있으며, 플랜지가 있는 형태인 앵글바(angle bar)와 티바(tee bar)에서는 웹 두께가 15mm 일 경우에는 유공비의 증가와 상관없이 최종강도는 거의 같게 평가하고 있다. 웹 두께가 12mm 조건에서는 유공비가 0.24부터 0.36까지는 티바(tee bar)의 경우에 최종강도 분포가 높게 형성되고 있지만, 0.36이후의 유공비에 대해서는 앵글바(angle bar) 최종강도 분포와 거의 유사한 분포 경향을 보이고 있다. 플랫바(flat bar)의 경우에는 유공비의 증가와 함께 최종강도 감소비는 일정한 비율로 감소하고 있으며, 웹의 높이가 압축최종강도 특성을 구분하는데 있어서 큰 역할을 하지 못함을 알 수가 있다.

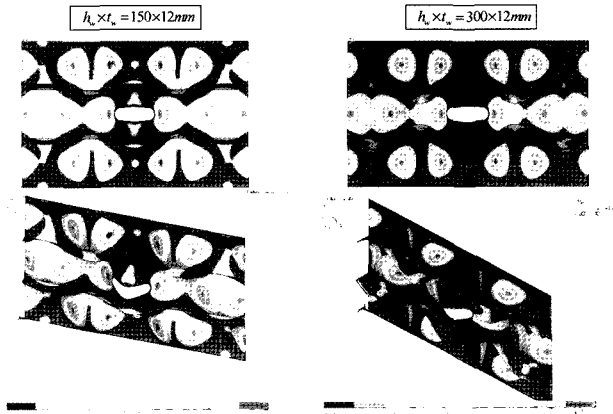


Fig. 5 Comparison of collapse pattern and distributed yielding stress on the ultimate strength varying the web height with flat-bar stiffener under compressive load($d_c/b = 0.24$).

플랫바(flat bar) 보강재를 고려한 유공보강판의 최종강도 상태에서의 웹의 높이에 따른 처짐과 응력분포를 Fig. 5에서 나타내고 있다. 웹의 두께와 유공비를 고정하고 웹의 높이를 150mm인 조건과 300mm인 조건으로 분류해서 비교하고 있다. 위 두가지 조건에서의 압축최종강도 붕괴패턴은 웹의 국부 좌굴과 판에서의 국부좌굴이 동시에 나타나고 있으며, 특히 웹의 높이가 상대적으로 증가한 경우인 300mm에서는 유공주위에 부착된 보강재에서의 처짐이 크게 발생하고 있다.

유공비가 0.67에서의 플랫바(flat bar) 보강재를 포함한 유공보강판 모델에서의 압축최종강도 상태에서의 붕괴패턴과 등가응력(equivalent stress) 분포를 웹 높이 150mm와 300mm로 분류하여 Fig. 6에 나타내고 있다. 유공비가 Fig. 5에 비교하여 크게 증가하면서, 웹 높이가 150mm에서는 유공주위에서 국부적으로 강도분담을 하며, 등가응력 분포는 유공주위로 부채꼴 모양으로 분포하고 있다. 붕괴패턴은 웹의 국부좌굴이 지배적으로 작용하였으며, 이러한 결과는 웹 높이가 300mm인 경우의 결과에서도 유사하다. Fig. 7의 그래프는 보강재의 형태가 플랫바(flat bar)에서의 유공비의 증가에 따른 압축최종강도 분포를 각 웹 두께와 웹 높이에 대해서 나타내고 있다. 웹 두께가 12mm에서는 웹 높이가 200mm에서 최종강도가 가장 높게 나타나고 있으며, 웹 높이가 300mm 조건에서 가장 낮은 최종강도를 보이고 있다. 이러한 원인은 이미 언급한바와 같이 플랫바(flat bar)의 단면속성 형태상 압축하중을 받게 되면 웹의 높이가 증가 할수록 비틀림에 의한 웹 좌굴 혹은 트리핑 거동이 급작스럽게 발생하게 되어, 그 발생시점부터 면내강성 감소가 크게 나타나서, 압축최종강도 또한 낮게 평가하기 때문이다. 웹 두께가 15mm로 증가하게 되면 최종강도 분포는 좀 더 복잡한 분포 특성을 가지게 된다. 즉, 웹 높이가 200mm 인 경우에는 최종강도가 높게 평가되고는 있지만, 유공비가 0.2에서 0.48까지의 영역에서만 가장 높은 최종강도 분

포를 나타내며, 유공비가 증가하면, 서서히 감소한다. 유공비 0.48이후의 최종강도 평가에서 가장 높은 압축최종강도를 나타내는 조건은 웹 높이가 250mm일 때이고, 웹 높이가 300mm에서는 유공비가 0.2부터 0.48까지는 가장 낮은 압축최종강도 분포를 보이다가 유공비가 0.48이후에서는 극한강도가 유공비가 증가하였음에도 불구하고 오히려 증가하는 경향을 나타낸다. 웹 높이가 150mm 조건에서는 가장 낮은 최종강도 값을 나타내고 있으며, 특히 유공비가 0.48이후에서는 강도 감소가 크게 나타나는 특성을 보인다. 위 결과를 살펴볼 때 플랫형 보강재의 설계 시 설계변수(웹의 두께와 웹의 높이)는 좌굴 발생 시 붕괴패턴을 구분하는데 크게 영향을 나타내며, 이는 압축최종강도 특성을 결정하는데 중요한 요소이다.

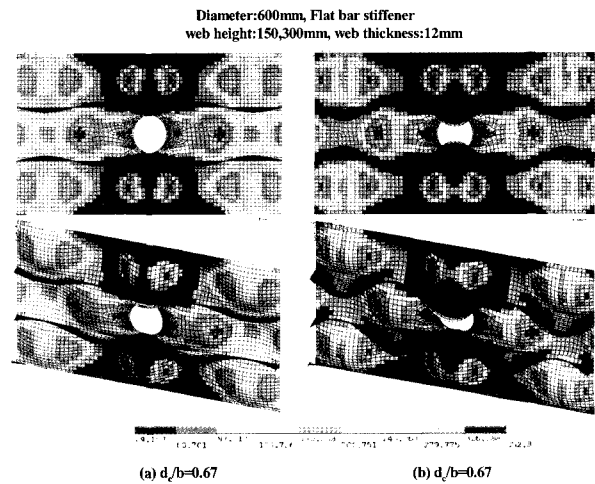


Fig. 6 Comparison of collapse pattern and distributed yielding stress on the ultimate strength varying the web height with flat-bar stiffener under compressive load($d_c/b = 0.67$).

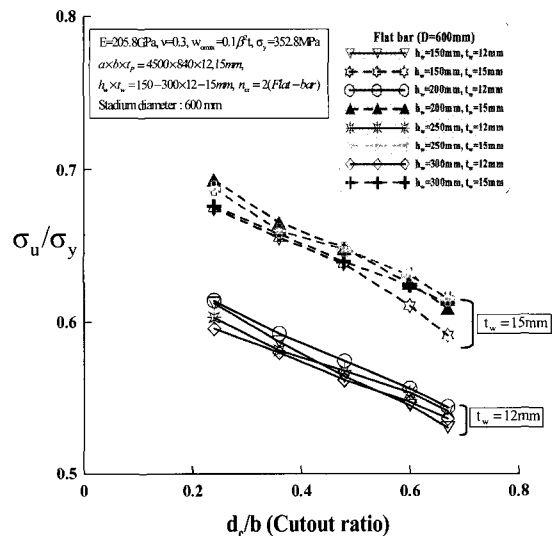


Fig. 7 Comparison of average stress and cutout ratio of the perforated stiffened plate with a flat bar stiffener($D=600mm$)

유공의 최대 지름이 700mm인 조건에서의 설계변수를 고려한 해석결과를 평균응력과 유공비의 관계로 Fig. 8에서 나타내고 있으며, 전체적인 압축최종강도 분포 형태는 Fig. 4에서의 경향을 유지하고 있다. 그러나, 웹 두께가 12mm이고, 보강재의 단면속성이 플랫폼(flat bar)의 경우에는 앵글바(angle bar) 조건에서의 최종강도 차이가 유공 지름이 600mm인 경우 보다는 작게 분포하고 있다.

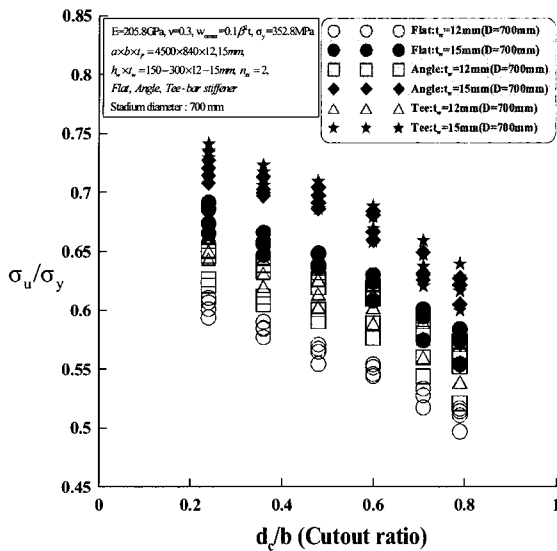


Fig. 8 Comparison of average stress and cutout ratio of the perforated stiffened plate with a diameter 700mm cutout.

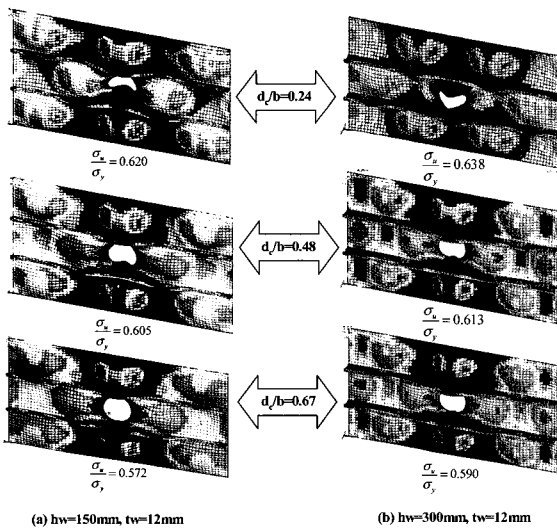


Fig. 9 Comparison of collapse pattern and distributed yielding stress on the ultimate strength varying the web height with angle-bar stiffener under compressive load.

Fig. 9에서는 앵글바(angle bar) 단면속성 보강재로 구성되어 있는 유공보강판에 유공지름의 크기가 600mm인 경우에 대해서, 웹 높이를 각각 150, 300mm로 변화하여, 유공비에 따른 최종강도 상태에서의 붕괴패턴과 재료의 항복응력 분포를

나타내고 있다. 유공비가 증가하면서, 최종강도는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이 감소량은 크게 나타나지 않고 있다. 이러한 원인으로서는 유공주위에서 좌굴이 발생할 경우, 상대적으로 무공인 판에서의 강도감소가 크기 때문이다.

또한, 유공비가 작은 경우인 0.24에서는 보강판의 전체에서 강도분담이 이루어지고 있으나, 유공비가 점점 증가 할 수록 유공주위 근방의 유효면적에서만 강도분담을 하고 있다. 그러나, 보강재의 단면계수가 증가한 경우에는 보강재와 판에서 강도분담 영역이 증가하고 있음을 알 수가 있다. 특히, 유공주위에서 발생한 초기항복은 압축하중이 증가함에 따라서 부채꼴 모양으로 최종강도까지 전개됨을 알 수가 있다.

이 결과는 웹의 높이가 계속해서 증가할지라도 압축최종강도는 비례해서 증가하지 않음을 나타내주며, 실제 초기구조설계 시 유공이 존재하는 판넬의 보강재 선택에 있어서 선급협회의 기준에 의한 단면계수값을 상회하였을지라도 보강재의 국부 좌굴 및 유공비에 따른 유공주위의 초기 소성항복에 의한 영향을 고려해야 한다. 이는 재료적인 비선형과 기하학적 비선형성을 동시에 고려하는 최종강도 해석을 통한 좀 더 합리적인 설계로 평가를 해야 한다는 것을 나타낸다. 실제 유공이 존재하는 프레임(frame)사이에는 보강재가 위치하며 인접한 프레임에서는 무공판이 존재하고 있다. 따라서 평판에서의 유공에 따른 최종강도 분포는 유공비에 큰 영향을 받게 되지만, 유공보강판 에서는 그 영향이 보강재의 역할로 인하여 상대적으로 감소된다. 앵글바(angle bar) 보강재의 단면속성을 고려한 경우, 플랫폼(flat bar) 조건보다 웹에서의 비틀림 거동이 상당히 제어가 되고 있으며, 붕괴패턴 또한 상이하게 나타나고 있다. 압축최종강도 분포는 웹의 단면계수가 2배로 증가하였음에도 불구하고 강도는 크게 증가하지 않았다.

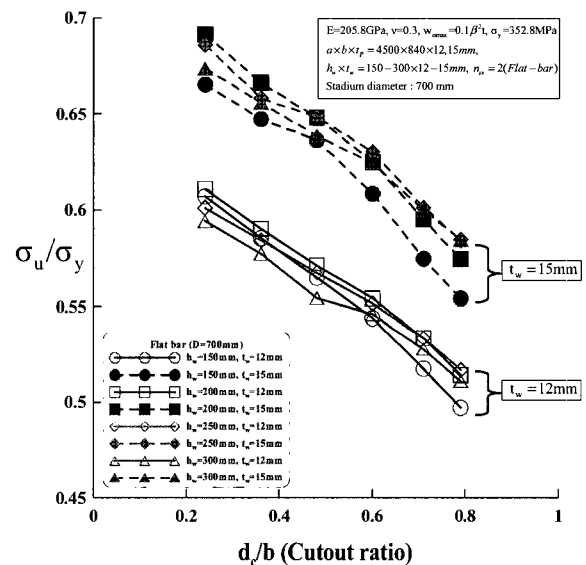


Fig. 10 Comparison of average stress and cutout ratio of the perforated stiffened plate with a flat bar stiffener(D=700mm)

유공지름이 700mm인 조건에서의 보강재의 형태가 플랫폼 (flat bar)에서의 압축최종강도 분포를 고려된 설계변수에 대해서 Fig. 10에서 나타내고 있다. 웹 두께가 12mm에서의 최종강도 분포는 유공지름이 600mm에서의 분포형태와 경향은 비슷하나, 웹 높이가 300mm인 경우와 웹 높이가 150mm인 경우에 유공비가 0.48을 기준으로 전자의 조건은 유공비의 증가에 따라서 최종강도 감소 기울기가 변하면서 강도를 약간 높게 평가하기 시작하며, 후자의 경우는 강도 감소가 크게 나타나기 시작한다. 위 결과에서도 알 수 있듯이 웹 높이가 200, 250mm에서는 유공비의 증가에 따른 강도감소가 일정하게 나타나고 있으며, 압축최종강도는 거의 같은 지점에서 분포하고 있다. 웹 두께가 15mm의 결과에서는 유공비가 0.48에서 여러 가지 변화가 발생하고 있다. 웹 두께가 12mm에서도 나타난 공통점으로는 웹 높이가 300mm와 웹 높이가 150mm의 압축최종강도 분포 특성이 유사하게 발생하고 있으며, 웹 높이가 250mm인 조건에서 이 유공비에서부터 최종강도를 높게 평가하고 있는 분포 특성을 나타내고 있다. 또한 이 유공비를 기점으로 웹 높이가 150, 200mm를 제외하고는 모든 조건에서 유공비의 증가와 상관없이 최종강도가 거의 같은 지점에서 분포하고 있다. 웹 높이가 200mm 조건에서는 유공비가 0.71이상에서부터는 강도 감소가 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다.

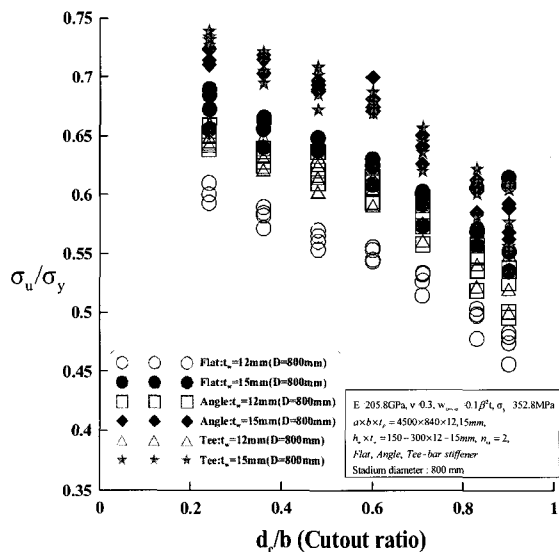


Fig. 11 Comparison of average stress and cutout ratio of the perforated stiffened plate with a diameter 800mm cutout.

유공지름이 800mm인 조건에서의 보강재의 단면속성을 고려한 압축최종강도 분포를 유공비에 따라서 Fig. 11에서 나타내고 있다. 앵글바(angle bar)와 티바(tee bar)의 단면속성을 지닌 보강재의 해석결과가 거의 유사한 최종강도 분포를 나타내며, 유공비가 0.71이상에서부터는 고려된 3가지 보강재의 압축최종강도 분포의 차이가 점점 줄어들고 있다. 유공지름이 800mm인 조건에서의 보강재의 형태가 플랫폼(flat bar)에서의 최종강도 분포를 고려된 설계변수에 대해서 Fig. 12에서 나타내고 있다. 웹 두께가 12mm에서의 최종강도 분포는 유공

지름이 700mm에서의 분포형태와 경향은 비슷하며, 유공비가 0.71 이상에서는 웹 높이가 150mm 조건을 제외하고는 최종강도 평가 시점이 거의 같은 지점에서 발생하고 있다. 웹 두께가 15mm에서의 압축최종강도 분포 특성도 Fig 10의 결과와 유사하며, 웹 높이가 150mm에서는 유공비가 0.36에서 0.48로 증가하였음에도 불구하고, 최종강도는 거의 같게 평가하고 있다. 이러한 현상의 원인은 본 논문에서 고려한 유공의 형상에 기인한다. 즉, 원형 유공이 아니기 때문에, 유공주위에서 발생하는 좌굴패턴에 따라서 압축최종강도 특성이 결정되어지며, 위 조건에서는 비록 유공비가 증가하였을지라도 붕괴패턴이 같음으로서 실질적인 압축최종강도 차이는 거의 없게 나타나고 있다.

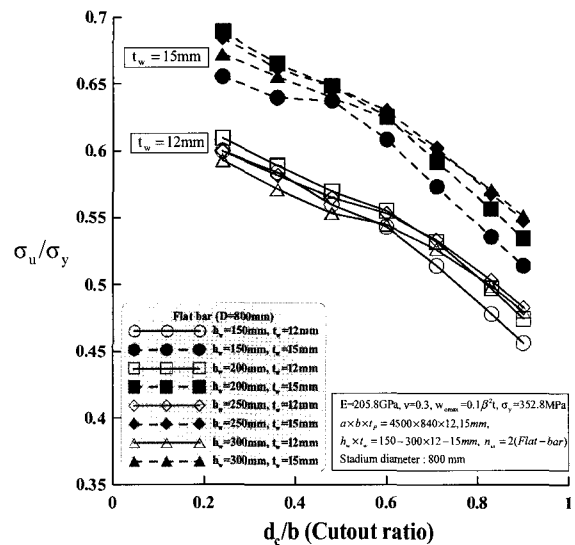


Fig. 12 Comparison of average stress and cutout ratio of the perforated stiffened plate with a flat bar stiffener(D=800mm)

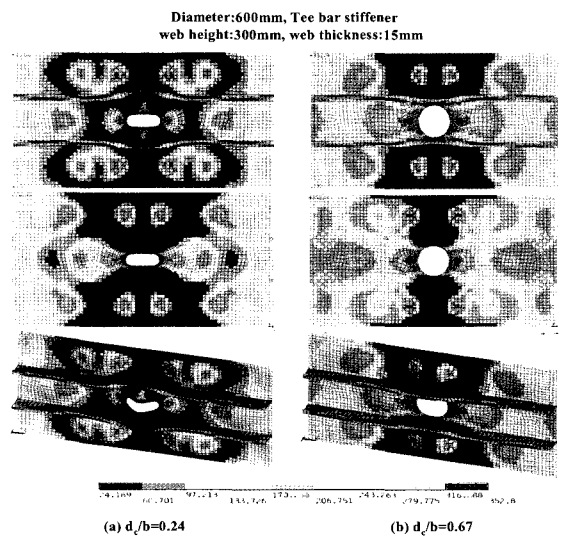


Fig. 13 Comparison of deflection shape and distribution of yield stress according to cut out ratio of the perforated stiffened plate

보강재의 단면속성이 티바 인 경우, 유공비가 0.24인 경우와 최대크기인 0.67의 최종강도 상태에서의 처짐과 동가응력 평가를 Fig. 13에서 비교하고 있다. 유공비가 작은 조건에서는 항복범위가 유공판의 중앙부위를 관통하고 있으며, 하중분담요소가 전체적으로 넓게 분포하고 있다. 그러나, 유공비가 최대 크기인 0.67로 증가하게 되면, 유공주위에서 발생한 응력은 보강재와 인접한 무공판으로 국부적으로 항복이 전개되며, 유공주위의 요소에서는 하중분담이 크게 저하함을 알 수가 있다.

조사된 실적선에서 사용 중인 유공지름의 최대크기인 600, 700, 800mm를 고려하고, 웹의 두께, 웹 높이, 판 두께를 변수로 하여 해석한 결과를 Fig. 14에서 나타내고 있다. 판 두께와 웹 두께는 각각 12, 15mm, 웹 높이는 150mm부터 300mm까지 50mm간격으로 변화 하였다. 웹 두께가 15mm인 경우에 있어서 유공비가 커질수록 웹 높이에 따라서, 압축최종강도가 차이가 나타나고 있으며, 웹 두께가 12mm에서는 웹 높이의 증가는 최종강도에 큰 영향을 미치지 않고 있으므로, 해당 설계식 개발 시 위 변수의 영향을 무시하였다. 실제 무공 보강판 구조에서는 보강재의 치수비가 좌굴 및 최종강도에 큰 영향을 주지만, 유공보강판 구조에서는 유공의 존재에 따라서, 아주 다른 붕괴메커니즘을 나타냄으로서 이와 같은 현상을 나타낸다. 대체적으로 경향성이 있는 최종강도 분포를 나타내고 있는 웹 두께 12mm에 대해서 최소자승법을 사용하여 커브피팅(curve fitting)을 하고, 이 결과를 바탕으로 웹 두께가 15mm인 압축최종강도 예측 설계식을 개발하였다. 특히, 웹 두께가 15mm인 경우에 유공비가 0.6 이하의 조건에서는 웹의 높이가 250-300mm에서 압축하중에 의한 웹에서 발생한 국부좌굴로 인하여 최종강도 분포가 낮게 평가되고 있으며, 아래의 식(1)과 같이 압축최종강도 예측 설계식을 개발하였다.

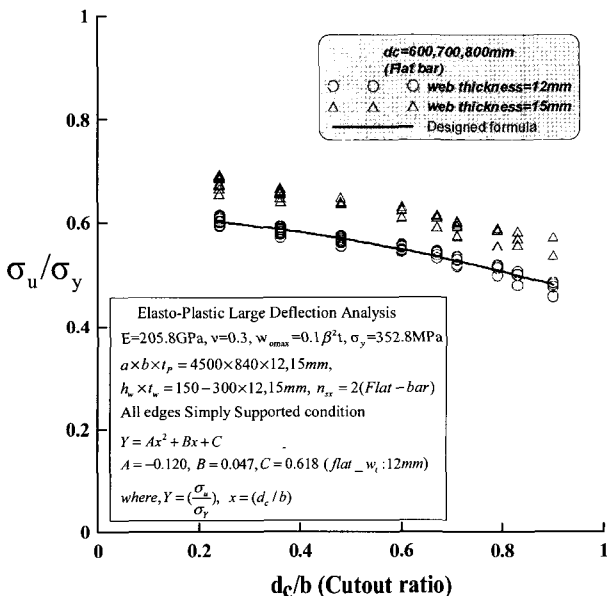


Fig. 14 Average compressive stress and cut out ratio of the perforated stiffened plate with a flat stiffener under axial loading.

$$Y = (Ax^2 + Bx + C) : \text{web thickness } 12\text{mm} \quad (1)$$

$$Y = (Ax^2 + Bx + C)/D : \text{web thickness } 15\text{mm}$$

$$A = -0.120, B = -0.047, C = 0.618, D = a_1(d_c/b) + a_2$$

$$a_1 = -0.033, a_2 = 0.899$$

$$\text{where, } Y = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right), x = (d_c/b)$$

Fig. 15에서는 플랜지가 있는 보강재 형태인 앵글바(angle bar) 보강재 단면속성을 고려한 결과를 평균응력과 유공비에 따라서 나타내고 있다. 웹 두께가 12mm에서는 유공비의 증가와 함께 웹 높이에 따라서 압축최종강도가 미소하게 변화하고 있으며, 이 차이는 큰 영향을 주지 않으므로, 해당 설계식 개발 시 웹 높이에 대한 영향을 고려하지 않았다.

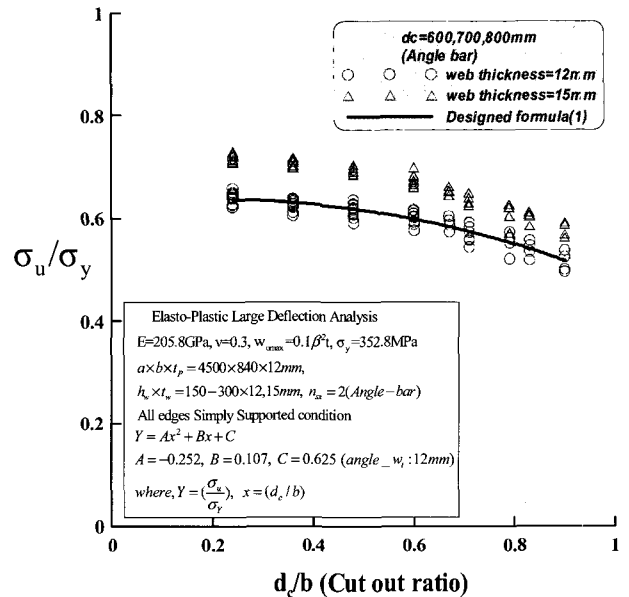


Fig. 15 Average compressive stress and cut out ratio of the perforated stiffened plate with an angle stiffener under axial loading.

웹 두께가 15mm에서는 유공비가 0.43이하에서는 보강재의 높이에 대한 영향이 거의 나타나지 않지만, 그 이후의 유공비에서는 영향이 발생하고 있다. 위의 경우에도 웹 두께가 12mm인 경우에 대해서 압축최종강도 평가 설계식을 개발하고, 이 식을 바탕으로 웹 두께가 15mm의 최종강도 예측 설계식(2)을 아래와 같이 개발하였다.

$$Y = (Ax^2 + Bx + C) : \text{web thickness } 12\text{mm} \quad (2)$$

$$Y = (Ax^2 + Bx + C) \times D : \text{web thickness } 15\text{mm}$$

$$A = -0.252, B = 0.107, C = 0.625, D = a_1(d_c/b) + a_2$$

$$a_1 = -0.027, a_2 = 1.135$$

$$\text{where, } Y = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right), x = (d_c/b)$$

Fig. 16에서는 티바(tee bar) 보강재 단면속성을 고려한 결과를 평균응력과 유공비의 관계로 나타내고 있다. 플랜지가 있는 보강재에서는 웹 두께에 따라서 압축최종강도 분포가 유사하게 나타나고 있으며, 이 단면속성 보강재를 고려하였을 경우에는 유공비의 증가에 따라서, 유공 길이별로 최종강도의 차이가 나타나고 있다. 그러나, 이 차이는 전체적인 설계식 개발 시 크게 고려될 변수로서는 미비하여, 이 변수는 고려하지 않았다. 극한강도 예측 설계식(3)을 아래와 같이 개발하였다.

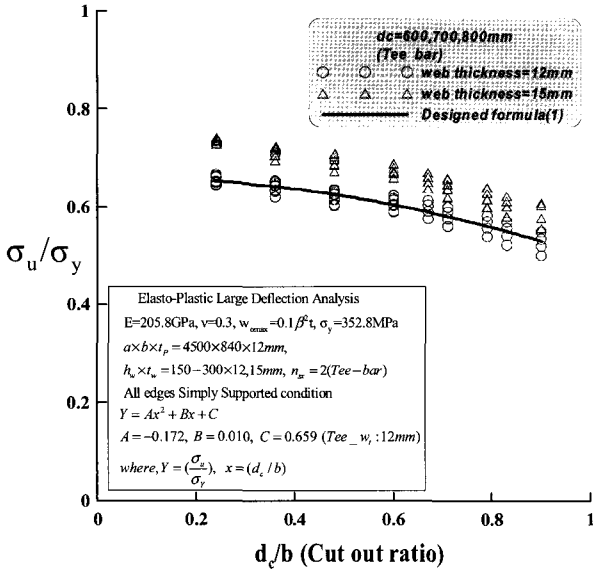


Fig. 16 Average compressive stress and cut out ratio of the perforated stiffened plate with a tee stiffener under axial loading.

$$Y = (Ax^2 + Bx + C) : \text{web thickness } 12\text{mm} \quad (3)$$

$$Y = (Ax^2 + Bx + C) \times D : \text{web thickness } 15\text{mm}$$

$$A = -0.172, B = 0.010, C = 0.659, D = a_1(d_c/b) + a_2$$

$$a_1 = -0.029, a_2 = 1.129$$

$$\text{where, } Y = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right), x = (d_c/b)$$

Fig. 17에서는 앞서 제안된 압축최종강도 평가 설계식(1)의 적용성을 검증하기 위하여 유한요소 시리즈해석 결과와 비교 결과를 나타내고 있다. 그래프에서 나타내는 원형 기호는 웹 두께가 12mm인 경우의 결과를 나타내고 있으며, 사각형 기호는 웹 두께가 15mm의 결과를 표현하고 있다. 웹 두께가 12mm인 경우에는 설계식/유한요소해석 결과의 평균값은 1.024, 표준편차는 0.014이고, 두변수간의 상관관계 계수값은 0.960 으로 강한 선형대응을 하고 있다. 웹 두께가 15mm에서의 설계식/유한요소해석 결과의 평균값은 1.000, 표준편차는 0.017, 두변수간의 상관관계 계수값은 0.959로 계수관계는 선형성을 유지하고 있음을 알 수가 있으며, 웹 두께가 15mm의 압축최종강도 평가 설계식이 정도성이 더 좋게 나타나고 있

며, 2가지 조건에서의 제안된 설계식은 압축최종강도를 평가 하는데 있어서 적용성이 확인되었다고 판단된다.

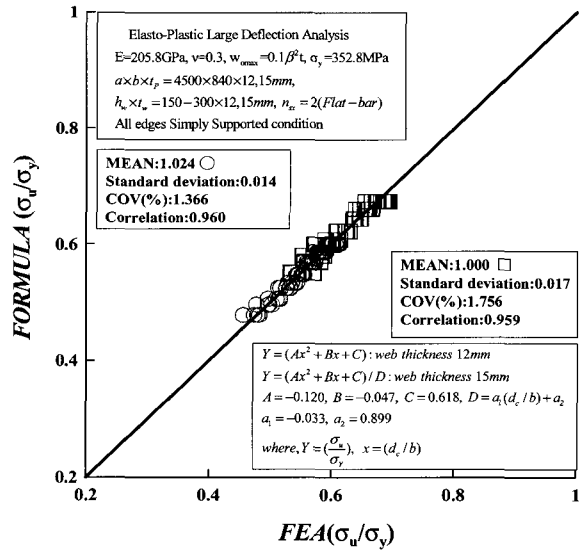


Fig. 17 Comparison between proposed formula and FE analysis results of the perforated stiffened plate with a flat stiffener under axial loading.

Fig. 18에서는 앵글바(angle-bar) 보강재 단면속성을 가진 경우의 유공보강판 모델에서 압축최종강도 설계식의 오차를 검증하기 위하여 유한요소 시리즈해석 결과와 비교 결과를 나타내고 있으며, 제안된 설계식과 유한요소법의 비교는 결과 그래프에서 보여주듯이 신뢰할 수 있는 정도성을 보유하고 있다고 판단된다. 특히, 플랜지가 있는 앵글바(angle bar), 티바(tee bar)보강재에서의 최종강도 분포도는 경향성을 갖고 있으므로, 개발된 설계식과 유한요소해석결과와의 비교 시 데이터의 수렴정도는 더욱 더 향상된다.

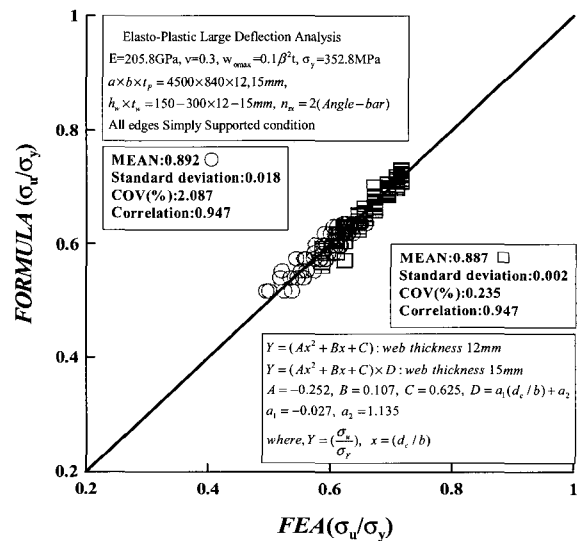


Fig. 18 Comparison between proposed formula and FE analysis results of the perforated stiffened plate with an angle stiffener under axial loading.

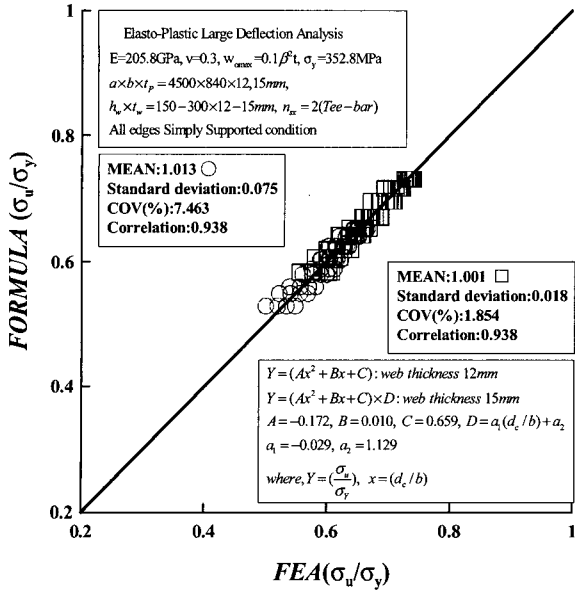


Fig. 19 Comparison between proposed formula and FE analysis results of the perforated stiffened plate with a tee stiffener under axial loading.

Fig. 19에서는 티바(tee-bar) 보강재 단면속성을 가진 경우의 유공보강판 모델에서 압축최종강도 설계식의 오차를 검증하기 위하여 유한요소 시리즈해석 결과와 비교 결과를 나타내고 있다. 위 보강재 단면을 고려한 최종강도 거동에서는 보강재 웹의 길이의 증가에 따라서, 압축최종강도의 증가가 유공비의 증가와 함께 차이를 나타내기 때문에, 실제 설계식 개발시 웹 높이의 영향을 고려하지 않음으로서, 표준편차값(standard deviation)이 타 조건에 비해서 크게 나타나고 있다. 그러나, 전체적인 압축최종강도 예측에는 큰 영향을 주지 않으므로 별도로 보강재의 웹 길이의 변수를 고려하지 않아도 충분한 정도의 예측이 가능하다고 판단된다.

5. 결론

유공이 존재하는 보강판 구조에서는 중량경감, 사람 및 화물의 이동, 배관 등 다양한 목적으로 선박에서 빈번하게 사용중이며, 유공주위의 좌굴강도를 보강하기 위하여 여러 가지 단면속성의 종방향 보강재가 사용되고 있다.

본 논문에서는 선박구조에서 실제 사용되어지는 유공 보강판 모델을 조사하고, 이러한 데이터를 바탕으로 하여 유공보강판의 최종강도 특성을 분석하기 위한 표준적인 모델을 제시하였다. 해석에 사용된 설계변수로서는 세장비, 유공비의 크기, 보강재의 단면 형태 및 보강재의 치수비이고, 이러한 여러 가지 변수들의 영향을 고려하여 탄소성대변형 시리즈해석을 수행하고, 변수들의 영향을 고찰하였다. 또한 이러한 수치해석 결과를 바탕으로 하여, 손쉽게 적용할 수 있는 유공보강판의 압축최종강도 평가 설계식을 도출하였으며, 이러한 결과들은 초기구조설계 시 유공보강판의 최종강도 검토에 유용하게

사용되리라 판단된다.

- (1) 실적선의 자료를 기준으로 한 유공보강판 모델에 대한 선급의 기준이 보장되어야 한다. 현재의 기준에 의한 설계시 유공비의 증가에 따른 극한강도 감소가 크게 나타난다.
- (2) 유공보강판의 설계시 플랫바(Flat bar)보강재의 경우에는 좌굴에 의한 붕괴패턴을 고려하여 보강재 치수를 선정하여야만 한다.
- (3) 유공보강판에서의 보강재 웹 높이의 영향은 크게 나타나지 않고 있으며, 압축최종강도 평가 설계식 개발시 이 변수의 영향을 무시할 수 있었다.
- (4) 실적선에서 조사한 유공치수에 따른 압축최종강도 분포는 전체적인 경향은 유사하나, 보강재의 형태에 따라서 미소한 차이가 존재한다.
- (5) 유공비가 작은 경우에는 항복범위가 국부적으로 넓게 분포하며, 유공비가 증가하면서 항복범위는 유공주위의 유효면적과 보강재로 변화한다.
- (6) 제안된 설계식은 유공보강판의 압축최종강도를 평가하는데 있어서 적용성이 확인되었다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2007년도 산업자원부 주관 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행되었고 위 기관에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] 박주신(2004) "선체판의 2차좌굴을 고려한 비선형거동에 관한 연구", 공학석사학위논문.
- [2] 박주신, 고재용, 이준교(2005) "중, 횡방향 압축하중을 받는 유공판의 좌굴을 고려한 최종강도 설계식개발", 항해항만학회지.
- [3] 박주신, 고재용, 오경근(2006) "유공보강판의 좌굴 및 극한강도 특성에 관한 연구", 항해항만학회지, 제30권 6호, pp.439-446.
- [4] 심종원(2005) "유공 보강판의 최종강도 설계식 개발에 관한 연구", 부산대학교 대학원, 조선해양공학과 공학석사학위논문.
- [5] 전민정, 박영일, 백점기(2001) "선체 유공판의 좌굴 및 최종강도 설계식의 개발", 대한조선학회 추계 논문집, pp. 314-317
- [6] ANSYS Inc(2000). ANSYS theory manual - "Nonlinear buckling problem", Chapter 3, Part4, pp. 120-132.
- [7] Minoru Harada, Masahiko Fujikubo(2001) "Estimation of Buckling and Ultimate Strength of Rectangular Plate with Cutout", Meeting of KSSC Ship Structure Congress, July.

- [8] Paik, J. K. Ham, J. H., and Kim, E. N. (1992) "A new plate buckling design formula", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, pp.559-556.
- [9] 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.
- [10] Tetsuya Yao and Chikahisa Murakami(2001) "Buckling/Ultimate Strength of Perporated Rectangular Plate under Thrust", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, pp.731-737.

원고접수일 : 2007년 1월 9일

원고채택일 : 2007년 4월 12일