

論文

면내압축하중을 받는 유공판의 좌굴 및 최종강도 평가에 관한 연구

박주신* · 고재용**

* 목포해양대학교 해양시스템공학부 박사과정, ** 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

Estimation of Buckling and Ultimate Strength of a Perforated Plate under Thrust

Joo-Shin Park* · Jae-Yong Ko**

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

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

요 약 : 선체구조 부재에는 이중저의 거더 및 늑판등에서 유공을 가진 판이 많이 사용되고 있고, 이는 중량 경감, 사람 및 화물의 이동, 배관 등의 목적으로, 보통은 강도상 큰 문제가 없는 부위에 위치하지만, 때로는 불가피하게 높은 응력이 작용하는 부위에 설치해야 할 경우도 있다. 이러한 판에 유공의 존재는 면내 하중에 의한 탄성좌굴강도 및 최종강도에 큰 영향을 주게 된다. 따라서, 유공판의 탄성좌굴강도 및 최종강도 평가는 선박의 초기 구조설계단계에서 구조부재 치수를 결정할 때 검토해야 할 중요한 설계기준 중의 한가지 이다. 그러므로, 유공판에 대한 합리적인 신뢰적인 탄성좌굴강도 및 최종강도 설계식이 필요시 되고 있다. 본 연구에서는 다양한 중횡비와 유공의 치수비 그리고 세장비의 영향을 고려하여 탄소성대변형 유한요소법을 근간으로 한 해석코드인 ANSYS를 사용하여 수치계산을 수행하였다.

핵심용어 : 유공판, 초기처짐, 최종강도, 유한요소법, 좌굴강도, 처짐모드

ABSTRACT: Plate has cutout inner bottom and girder and floor etc. in hull construction absence is used much, and this is strength in case must be situated, but establish in region that high stress interacts sometimes fatally in region that there is no big problem usually by purpose of weight reduction, a person and change of freight, piping etc. Because cutout's existence gnaws in this place, and, elastic buckling strength by load causes large effect in ultimate strength. Therefore, perforated plate elastic buckling strength and ultimate strength is one of important design criteria which must examine when decide structural elements size at early structure design step of ship.

Therefore, and, reasonable elastic buckling strength about perforated plate need design ultimate strength. Calculated ultimate strength change several aspect ratios and cutout's dimension, and thickness in this investigation. Used program applied ANSYS F.E.M code based on finite element method

Keywords : Perforated Plate, Initial Deflection, Ultimate Strength, Finite Element Method, Buckling Strength, Deflection mode

1. 서 론

선체는 기본적으로 판부재들로 구성되어 있으며 이들 중 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 재분포하게 되어 심각한 강도문제를 일으킬 수가 있다. 그리고 최근의 선체 건조경향이 고장력강 사용 증가와 구조해석 및 최적설계 기술의 발달로, 선체구조는 점점 경량화 추세이며, 이로 인해 좌굴문제가 설계 시 중요한 검토사항으로 되고 있다.

이와 같은 측면에서 각 조선소에서는 각국 선급들이 제시

하는 좌굴설계식을 사용하여 강도계산을 하고 있으나 실제 선박의 유공판 치수 결정시, 이들 선급식은 경우에 따라 서 좌굴강도를 서로 상당히 다르게 나타내고 있어 설계자를 혼란스럽게 하는 경우가 있다. 유공판의 좌굴강도에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으나, 이들 대부분은 판의 중횡비가 1.0인 것을 대상으로 하고 있어 실제선박에서 사용하고 있는 유공판의 중횡비와는 다소 거리가 멀다. 또한 개공(Opening)의 형태와 위치등도 제한적인 결과들로서 실제 사용상에는 다소 어려움이 있다. 따라서, 본 연구논문에서는 중횡비, 세장비 그리고 유공의 크기를 변화시켜가며 최종강도를 계산하고 이를 바탕으로 유공판의 최종강도에 관한 설계식을 도출하여 기존의 선급에서 제시하고 있는 좌굴강도와의 검토를 하여 본 설계식의 유용성을 검증하였다.

* 학생회원 scv2434@mmu.ac.kr

** 정회원 kojy@mmu.ac.kr

2. 수치해석이론

2.1 해석대상 선정

Fig.1에서는 본 연구에 사용된 컨테이너선박(4500TEU)의 이중저구조에 배치도를 나타내고 있다. 현장에서 설계되어지고 있는 유공의 형상은 사각형, 타원형, 정원형이 주를 이루고 있으며 참고문헌[1]에서 이미 유공의 형상에 대한 최종강도 해석을 통하여 유공형상에 의한 최종강도 거동의 차이는 미비하였으며, 유공비가 가장 큰 설계 변수라는 결과를 확인한바가 있다.

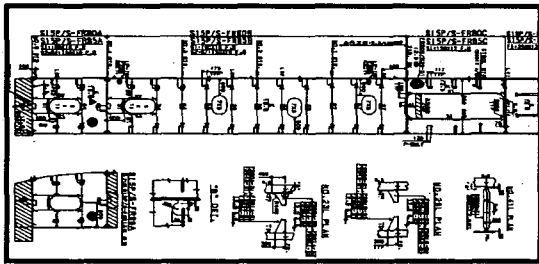


Fig.1 Inner bottom arrangement on the container ship (4500TEU)

본 논문에서는 중앙에 원공을 가진 유공판을 대상으로 유공판의 유공의 크기, 중횡비 및 두께를 변화시켜가며 탄소성 대변형 유한요소 시리즈해석을 수행하였으며, Fig.2에서 사용된 유한요소모델을 나타내고 있다. 사용된 재료의 물성치는 다음과 같다. 탄성계수(E)= 205.8GPa, 포아송비 (ν)=0.3, 항복응력 (σ_y)= 352.8MPa, 판폭(b)을 840mm로 일정하게 유지하고, 판길이(a)는 840, 1680, 2520, 3360, 4200, 5040mm와 판두께(t)는 10, 12, 15, 20mm까지 변화 시켰다. 하중성분은 판 길이 방향 압축하중과 판 폭방향 일축압축하중을 대상으로 하였다. 전자의 경우는 선저형 웹 혹은 만재시의 선축수압에 의한 압축하중을 받는 플로어 부재에 해당된다. 한편 후자는 이중저의 웹 혹은 플로어재에서 위로부터는 화물중량, 아래에서는 선저수압을 받고 있는 상태를 가정하였다. 판재에 존재하는 초기변형은 아래식 (1)을 이용하였다. 중방향으로 존재하는 초기변형성분은 Smith's initial deflection formula의 Average level ($0.1 \times \beta^2 \times t$)크기로 적용하였고, 용접잔류응력에 대해서는 고려하지 않았다.

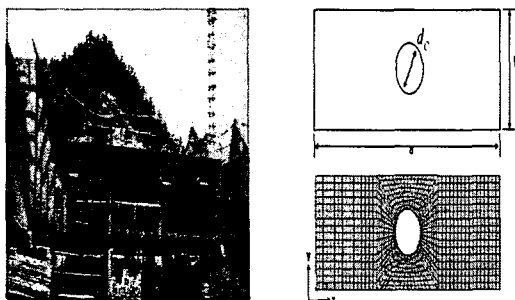


Fig.2 Model of rectangular plate with cutout

$$w_o = \sum_{i=1}^N A_{oi} \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

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

2.2 유공판의 탄성좌굴강도

선체구조설계의 최적화 기술과, 다양한 구조해석 기술의 발달로 인하여 선체의 경하중량은 점점 감소해가고 있으며, 이에 따라 박판부재의 사용증가에 따라 좌굴문제는 초기구조설계 시 중요한 고려요소가 되고 있으며, 판구조물에 대한 정확한 탄성좌굴강도 파악은 구조물의 안정성과 신뢰성 확보에 필수요소이다. 본 연구에서는 단일압축하중이 작용할 경우에 대해서 설계식을 도출하였다. 판에 대한 유공의 영향을 나타내기 위하여 유공판에 대해서 고유치탄성좌굴 시리즈 해석을 수행하여 무공판에 대한 좌굴감쇄계수를 도입하였으며, 이 결과를 바탕으로 하여 Curve fitting 을 이용하여 유공에 의한 판의 탄성좌굴 감쇄계수에 대한 설계식을 도출하였다. Fig.3에서는 중방향 압축력을 받는 유공판에 대한 유한요소해석 결과를 보여주고 있다. 중횡비의 영향을 고려하기 위하여 a/b 를 1.0-6.0까지 변화시켜가며 유공판의 탄성좌굴 계수(k_x)를 구하였다. 이렇게 구한 값을 무공판에 대한 유공판의 탄성좌굴 계수의 비로 중방향 압축력을 받는 유공판의 탄성좌굴 감쇄계수 ($R_{xE} = k_x/k_{x0}$)의 값을 사용하여 중축에 나타내었고, 횡축은 판폭에 대한 유공비(d_c/b)로 나타내었다.

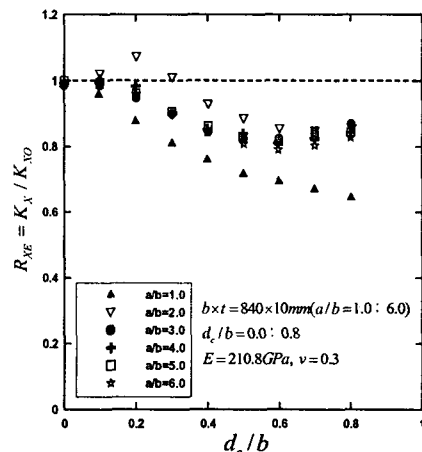


Fig.3 Reduction factor of the elastic buckling strength with FEA under longitudinal axial compression varying aspect ratios

유공비가 증가함에 따라 탄성좌굴감쇄계수의 값이 감소하는 경향을 보이고 있으며 $a/b=3.0\sim 6.0$ 의 경우 감쇄계수는 종횡비의 영향이 적게 나타나고 있다. $a/b=2.0$ 에서는 유공판의 탄성좌굴강도가 무공판의 탄성좌굴강도보다 높게 평가되는 특이를 보이게 되는데 이는 유공의 존재가 탄성좌굴 고유모드를 방해하기 때문이라고 알려져 있다. 박(2004)

Fig.4에서는 횡방향 압축하중 조건에서의 탄성좌굴강도값 분포를 나타내고 있다. 유공비의 증가에 따라 탄성좌굴감쇄계수는 감소하고 있으며, 종횡비 3.0이상에서는 감쇄계수 값의 감소가 거의 없는 거동을 나타내고 있으며 Fig.3에 비해 변화 정도가 적은 경향을 나타내고 있다.

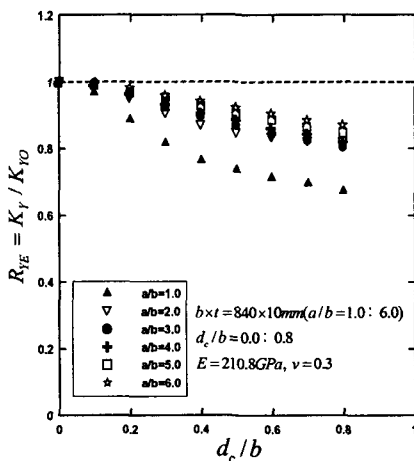


Fig.4 Reduction factor of the elastic buckling strength with FEA under transverse axial compression varying aspect ratios

2.3 유공판의 최종강도

최종한계상태설계의 구조설계 기준은 소성붕괴 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. 특히, 선박이 황천항해 시 극한적인 해상에서 요구하게 되는 구조강도를 검토할 경우에는 최종강도에 대한 계산은 반드시 필요하며, 최근에는 육상에서 사용되는 강구조물이나 해상구조물 뿐만 아니라 선박들의 구조설계에서도 최종강도를 기준으로 설계를 수행하고 있다.

2.4 종방향 압축하중이 작용하는 유공판의 최종강도 해석 및 설계식도출

종횡비, 유공의 크기, 세장비를 변화 시켜가며 범용유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 종방향 압축하중이 작용하는 유공판에 대한 최종강도 시리즈해석을 통하여 설계식을 도

출하였다. 유공의 크기비는 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8에 대해서 해석을 수행하였으며, 종횡비와 세장비의 영향을 고려하기 위해 종,횡방향 압축하중이 작용할 경우 각각 두께 10mm에 대해서 종횡비 1.0~6.0까지, 15mm에 대해서는 종횡비 3.0, 20mm는 종횡비 1.0, 3.0, 5.0에 대해서 각각 계산을 수행하였다.

Fig.5에서는 실제 컨테이너선(4500TEU)에서 가장 많이 사용되는 종횡비 3.0에서 종방향 압축력이 작용할 경우 유공비에 따른 탄소성대변형 거동을 나타내고 있다. 유공비가 0.2일 경우 무공판에 비해서 최종강도 이후 면내강성 감소 차이가 크다는 것을 알 수가 있다. 종횡비 3.0, 4.0, 5.0, 6.0에서는 각 종횡비의 고유모드를 유지하게 되며 유공비가 0.8에서는 판내 횡변형이 발생하기 전에 항복이 시작하여 결국은 유공주위의 최소단면이 전단면 항복하여 최종강도에 이르는 거동을 나타내게 된다.

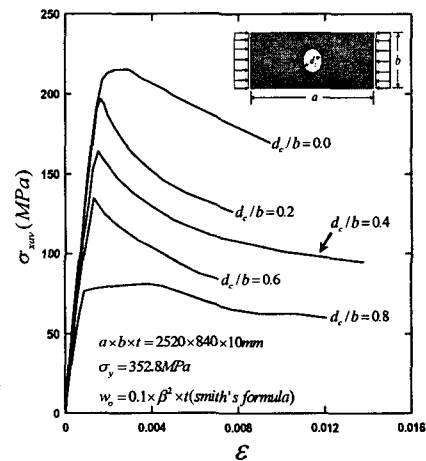


Fig.5 A comparison stress with strain curves varying the size of cutouts each aspect ratio 3.0

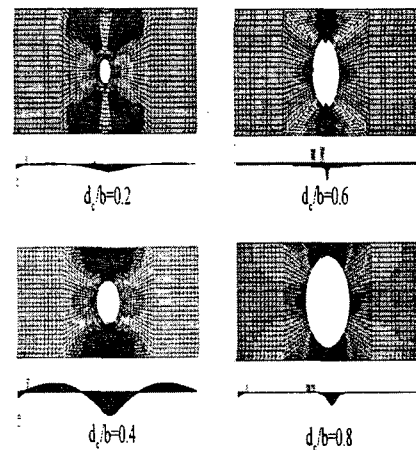


Fig.6 Deflection mode on the ultimate strength point of the aspect ratio 3.0

Fig.6에서는 종횡비 3.0이고 판두께가 20mm인 비교적 후판인 유공판에서의 종방향 압축하중이 작용하였을때의 유공비에 따른 최종강도 시점에서의 처짐모드와 판내 항복형태를 보

여주고 있다. 유공의 크기가 증가함에 따라 유공주위의 유효 단면의 감소로 인하여 유공주위에서 발생한 항복에 의해서 최종강도 시점이 결정되고 있으며, 유공비 0.4를 제외하고는 처짐모드 형태는 1모드를 나타내고 있다.

중횡비와 세장비의 영향을 고려하기 위해서 두께 15mm에 대해서는 중횡비 3.0, 두께 20mm에서는 중횡비 1.0, 3.0, 5.0에 대해서 각각 계산을 수행하였다. Fig.7에서는 종축은 종방향 압축최종강도 값을 항복응력으로 무차원 하여 나타내고 횡축은 유공비로 하여 중횡비 1.0-6.0까지 변수로 하여 유공비에 따른 중횡비의 영향을 나타내고 있다. 같은 유공비일 경우 중횡비의 영향은 거의 나타나지 않고 있음을 알 수가 있다. 실제 무공판의 경우에도 중횡비는 최종강도에 큰 영향은 미치지 않는다.

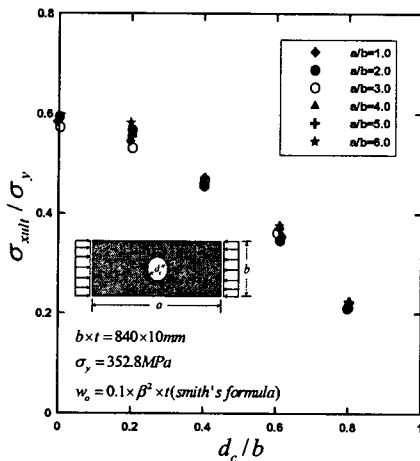


Fig.7 Ultimate strengths of plates with cutout under axial compression varying the aspect ratio(fixed t=10mm)

Fig.8에서는 세장비의 영향을 확인하기 위하여 두께를 20mm로 변화하고 중횡비 1.0, 3.0, 5.0에서의 유공비에 따른 최종강도값에 항복응력으로 무차원 하여 비교하고 있다. 두께가 두꺼워짐에 따라 초기좌굴 발생 시점이 늦어져서 결국 최종강도가 상대적으로 높게 평가되고 있는 공통점을 나타내고 있으며 두께가 배로 증가하였지만 유공비에 따라서 세장비의 영향은 미비하게 나타남을 보여주고 있다. 중횡비가 1.0에서 5.0으로 갈수록 유공비가 커지면 커질수록 최종강도 이후 면 내강성 감소율이 더 급격하게 증가하고 있는 경향을 보이고 있다.

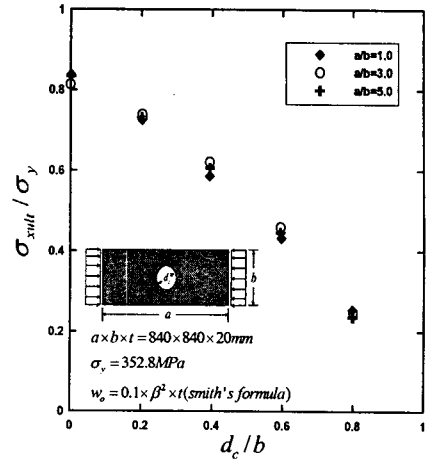


Fig.8 Ultimate strengths of plates with cutout under axial compression varying the aspect ratio(fixed t=20mm)

위 그래프에서 확인되듯이 종방향 압축력을 받는 유공판의 경우는 중횡비의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 실제 무공판의 경우에도 종방향 압축력을 받는 경우 중횡비가 최종강도에 미치는 영향은 극히 작은 것으로 알려져 있다.

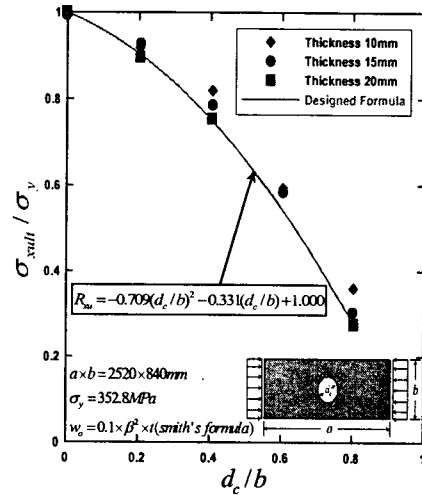


Fig.9 A comparison of the present ultimate strength formulations with FEA under longitudinal axial compression (aspect ratio=3.0)

Fig.9에서는 세장비의 영향을 고려하기 위해 앞서 계산한 값을 각각의 무공판에 대한 유공판의 최종강도비로 나타내었다. 중횡비 3.0에 대해서 두께를 10mm, 15mm, 20mm (\$\beta=3.47, 2.32, 1.74\$)를 변화시켜가며 구한 결과를 나타낸 것으로 확인되듯이 세장비의 영향도 무시할 수 있을 정도임을 알 수가 있다. 이상에서 검토한 결과를 바탕으로 다음과 같이 종방향 압축력이 작용하는 경우의 유공판의 최종강도에 관한 설계식을 도출 할 수 있다.

2.5 횡방향 압축하중이 작용하는 유공판의 최종강도 해석 및 설계식도출

횡방향 압축하중을 받는 유공판에 대한 탄소성대변형 시리즈 해석은 2.4의 종방향 압축력이 작용하는 조건과 동일한 조건을 적용하였다. 횡방향 압축하중이 작용하는 유공판에서는 종횡비가 1.0을 제외하고는 유공비에 따라 최종강도 변화가 적은 경향을 보이고 있다. 그러나, 종횡비 1.0에서는 유공이 존재하면서 최종강도는 점점 감소하는 경향을 보이고 있으며 이는 d_c/a 의 비율(중 유효단면)이 적어지면서 발생하는 현상으로 판단되며, 실제 선체 이중저 내판에서 사용되는 유공판의 종횡비는 1.0은 거의 찾아볼 수가 없으며 2.0이상임을 감안한다면 경향상의 문제라고 사료된다. 유공판에서 횡방향 압축하중이 작용할 때 유공비에 따른 최종강도 거동을 살펴보면 종횡비가 커지고 유공비가 증가함에 따라 최종강도 감소는 크게 차이를 보이며 종횡비가 증가할수록 감소량은 적어지는 경향을 나타낸다.

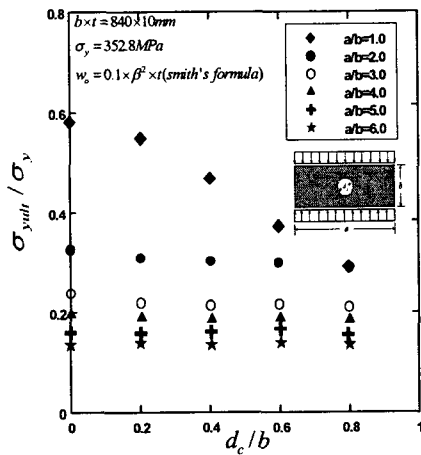


Fig.10 Ultimate strength of plates with cutout under transverse axial compression varying the aspect ratios (slenderness ratio=3.47)

Fig.10에서는 세장비의 영향을 고려하기 위하여 판두께를 10mm인 상대적으로 박판인 부재에 대해서 유공비와 최종강도를 항복응력으로 무차원하여 나타내고 있다. 종횡비 1.0에서는 유공비에 따라 최종강도값이 상당히 저하하였으며 종횡비 3.0이상에서는 그 차이가 미비하였다. 횡방향 압축하중 같은 경우에는 하중을 담당하는 판폭은 일정하게 고정되어있지만, 종횡비가 커짐에 따라 판 길이방향의 증가로 인하여 유효단면이 증가하여 종횡비가 커지면 유공비가 커지더라도 최종강도는 거의 같게 나타나게 된다. 종방향압축이 작용하는 유공판에서와 마찬가지로 횡방향 압축하중이 작용할 경우에도 종횡비 3.0이상에서는 세장비의 영향은 최종강도 거동에 있어서 영향이 크지 않음을 알 수가 있다.

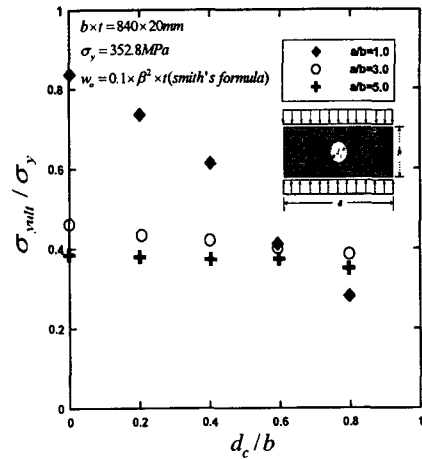


Fig.11 Ultimate strength of plates with cutout under transverse axial compression varying the aspect ratios (slenderness ratio=1.74)

Fig.11에서는 상당히 후판 판두께인 20mm에 대해서 종횡비 1.0,3.0,5.0에 대해서 최종강도값에 항복응력으로 무차원하여 나타내고, 횡축은 유공비로 나타내고 있다. 판두께가 커지더라도 종횡비 1.0에서는 유공비에 따라 최종강도 값이 큰 차이를 보이고 있으나, 종횡비 3.0이상에서는 그 차이가 미비함을 알 수가 있다. 결국 횡방향 압축하중이 작용하는 유공판의 경우에는 종횡비와 유공비 그리고 세장비까지 고려할 수 있는 설계식이 필요하다.

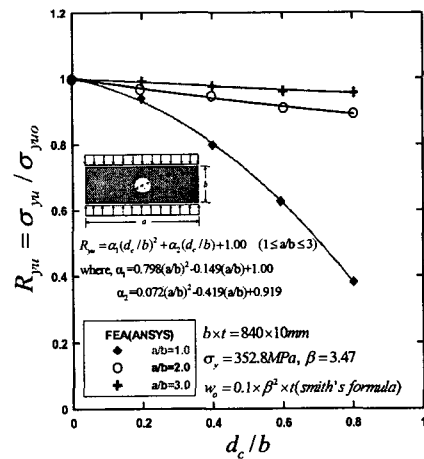


Fig.12 A comparison ultimate strength formulations with FEA under transverse axial compression(a/b=1.0-3.0)

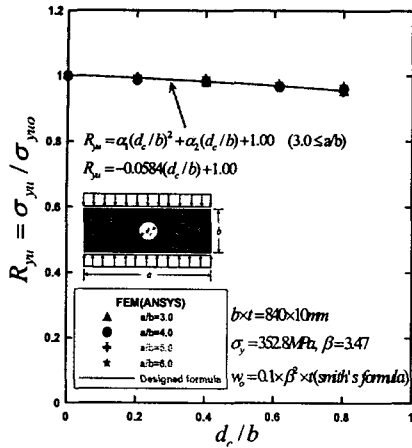


Fig.13 A comparison ultimate strength formulations with FEA under transverse axial compression(a/b=3.0-6.0)

Fig.12와 Fig.13에서는 횡방향 압축하중이 작용하는 유공 판에 대하여 종횡비 $1 < a/b < 3$ 구간과 $3 < a/b < 6$ 구간으로 나누어서 종횡비와 유공비를 고려한 설계식을 도출하고 있다. 종횡비가 3.0 이상에서는 유공감쇄비 분포의 차이가 미비하여 Fig.13에서 보는 것과 같이 1차식으로 간단히 curve fitting 하여 설계식을 도출하였다.

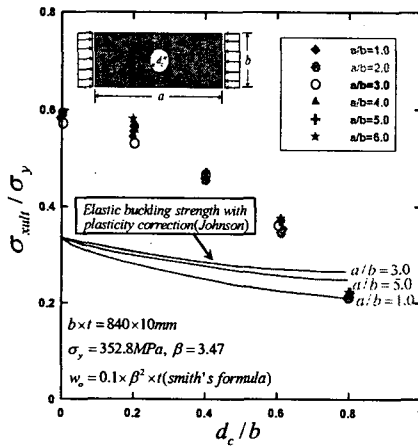


Fig.14 A comparison average stress with elastic buckling strength by plasticity correction under longitudinal axial compression(slenderness ratio=3.47)

다음은 실제 각 선급에서 사용하고 있는 존슨-오스텐펠드 소성수정식을 사용하여 임계좌굴강도를 구한 값에 본 연구에서 구한 최종강도 값의 비교를 나타내고 있다. Fig.14에서는 종횡비에 따라서 최종강도 값을 항복응력으로 무차원한 값을 유공비에 따라서 비교하고 있다. 상대적으로 박판인 판두께 10mm에서는 임계좌굴강도 값이 최종강도 값 보다 상대적으로 적은 값을 나타내고 있다. 그러나, Fig.15에서는 후판 판두께인 20mm가 되면서 선급에서 제시하는 임계좌굴강도 값이 최종강도 값을 상회하고 있으며, 이는 구조설계 시 상당한 오류를 범할 수 있음을 암시하고 있다. 또한 존슨-오스텐펠드의 소성수정식의 정도성에도 상당한 문제점을 안고 있음을 알 수가 있다.

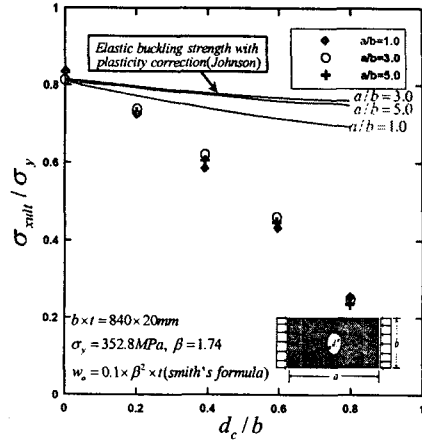


Fig.15 A comparison average stress with elastic buckling strength by plasticity correction under longitudinal axial compression(slenderness ratio=1.74)

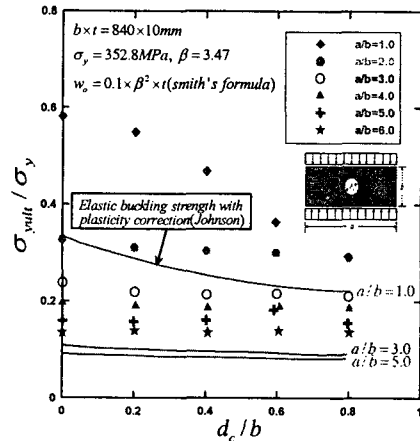


Fig.16 A comparison average stress with elastic buckling strength by plasticity correction under transverse axial compression(slenderness ratio=3.47)

Fig.16에서는 횡방향 압축하중 조건에서의 결과를 나타내고 있다. 종방향의 경우와 같이 박판에서는 선급에서 제시하는 임계좌굴강도 값이 최종강도 보다 낮게 평가되고 있으나, Fig.17 그래프에서 보듯이 상당히 후판인 판두께 20mm에서는 종횡 1.0

같은 경우에는 최종강도 값을 상회하는 강도값을 나타내고 있다.

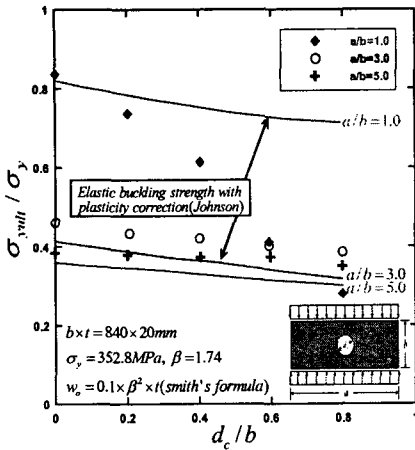


Fig.17 A comparison average stress with elastic buckling strength by plasticity correction under transverse axial compression (slenderness ratio=1.74)

본 연구에서 사용한 종횡비는 1.0-6.0까지이며, 각 종횡비마다 5가지의 유공비에 따라서 종합적인 시리즈해석을 한 결과 각 선급에서 사용하고 있는 존슨-오스텐펠드 소성수정식은 세장비가 낮아지면 종횡비에 따라서 최종강도 값보다 높은 값을 나타내는 오류가 나타났다. 따라서, 좀더 현실적이고 신뢰성 있는 설계를 하기 위해서는 최종강도를 기반으로 한 설계 (Ultimate Strength Limit State Design)이 필요하다고 할 수가 있다.

4. 결론

유공판은 중량경감, 사람 및 화물의 이동, 배관등 다양한 목적으로 선박에 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 선박에 실제 사용되어지는 모델을 기준으로 종횡비, 세장비, 유공비의 크기를 고려하여 고유치해석과 탄소성대변형 유한요소 해석을 통해 종, 횡방향 압축하중에 대한 설계식을 도출하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 종방향 압축하중만을 고려할 경우 종횡비 함수는 최종강도에 미치는 영향은 작다. 그러나, 횡방향 압축하중 조건에서는 종횡비가 증가함에 따라 최종강도가 크게 감소한다.

(2) 종방향, 횡방향 압축하중만을 고려할 경우 세장비의 영향도 무시할 정도로 적게 나왔다.

(3) 유공의 비가 0.6이상에서는 유공주위의 최소단면이 조기항복하여 전단면 항복으로 전개되며 이 상태에서 최종강도는 결정된다.

(4) 최종강도를 기준으로 한 개공영향계수값을 통하여 설계식을 도출하였다.

(5) 존슨-오스텐펠드 소성수정식을 사용하여 좌굴강도를 평가할 경우 상당한 문제점이 발생할 수 있으며, 현실적이 신뢰적인 구조강도 평가를 위해서는 최종강도를 기반으로 한 강도평가가 이루어져야 한다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1]. 박주신(2004.2) : 선체판의 2차좌굴을 고려한 비선형기동에 관한 연구, 공학석사학위논문.
- [2]. J.K. Paik, J.H. Ham and E.N. Kim(1992) : A new plate buckling design formula, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, pp.559-556.
- [3]. J.K. Paik, J.H. Ham and Jae 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.
- [4]. J.H. Ham and Oi Hyun Kim.(1991) " Buckling Strength Evaluation System ", Meeting of Korea Ship Structure Congress, Sep.
- [5]. 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.