

압축하중을 받는 유공판의 좌굴 및 최종강도 설계식 개발

Development of Buckling and Compressive Ultimate Strength Formulations for Rectangular Plate with Cutout

박 주 신*
Park, Joo-Shin

고 재 용**
Ko, Jae-Yong

ABSTRACT

Plate that have 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

1. 서 문

선체는 기본적으로 판부재들로 구성되어 있으며 이들중 상당수는 유공판(Perforated plate)이다. 선체에 설치된 유공판으로서선 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 야기시킬 수 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 제시하는 좌굴설계식을 사용하여 강도계산을 하고 있으나 실제 선박의 유공판 치수 결정시, 이들 선급식은 경우에 따라 서 좌굴강도를 서로 크게 다르게 나타내고 있어 설계자를 혼란스럽게 하는 경우가 있다.

* 학생회원 목포해양대학교 해양시스템공학부 박사과정 (Email : scv2434@mmu.ac.kr)

** 정회원 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수 (Email : kojy@mmu.ac.kr)

유공판의 좌굴강도에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으나, 이들 대부분은 판의 종횡비가 1.0인 것을 대상으로 하고 있어 실제선박에서 사용하고 있는 유공판의 종횡비와는 다소 거리가 멀다. 또한 개공(Opening)의 형태와 위치등도 제한적인 결과들로서 실제 사용상에는 다소 어려움이 있다. 따라서, 본 연구논문에서는 종횡비, 세장비 그리고 유공의 크기를 변화시켜가며 최종강도를 계산하고 이를 바탕으로 유공판의 최종강도에 관한 설계식을 도출한다.

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.

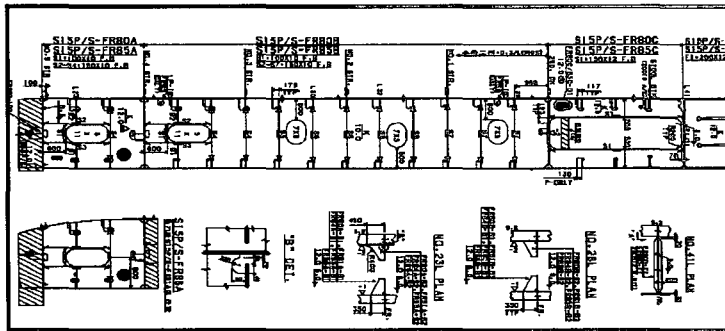


Fig.1 Inner bottom arrangement on the container ship (4500TEU)

본 논문에서는 중앙에 원공을 가진 유공판을 대상으로 유공판의 유공의 크기, 종횡비 및 두께를 변화시켜가며 탄소성 대변형 유한요소 시리즈해석을 수행하였으며, Fig.2에서 사용된 유한요소모델을 나타내고 있다. 사용된 재료의 물성치는 다음과 같다. 탄성계수(E)=205.8 GPa, 포아송비(ν)=0.3, 항복응력(σ_y)=352.8 MPa, 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 길이방향 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. 종방향으로 존재하는 5개의 초기변형성분은 Smith's initial deflection formula의 Average level($0.1 \times \beta^2 \times t$) 크기로 적용하였고, 용접잔류응력에 대해서는 고려하지 않았다.

$$w_o = \sum_{i=1}^5 A_{0i} \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

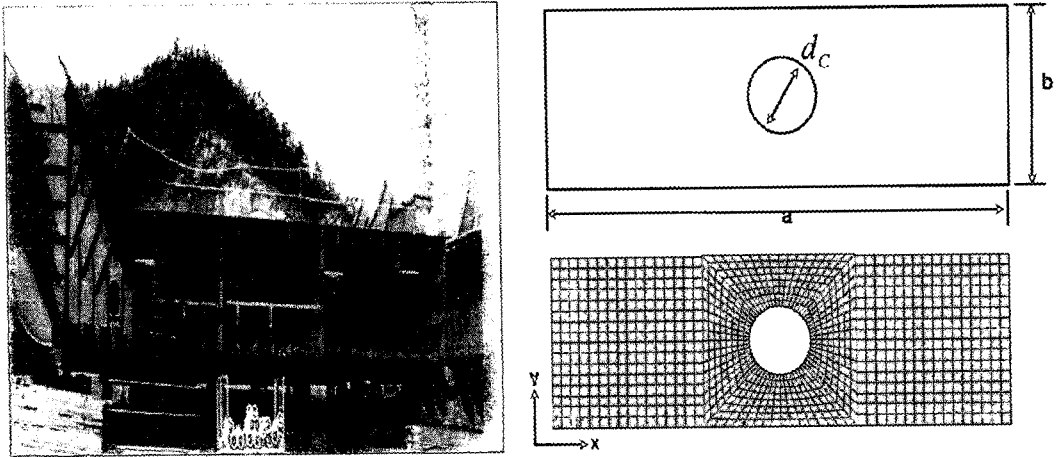


Fig.2 Model of rectangular plate with cutout

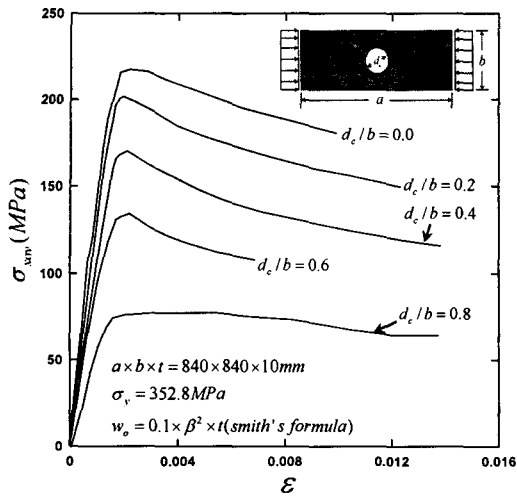
유공판의 내면에서는 회전구속이 없는 단순지지 경계조건을 설정하였으며, 실제 판 구조물을 구성한 판 부재는 주변에서 주위의 다른 판 부재와 연결되어 있는 연속적인 구조물을 이루고 있기 때문에 네면에서는 면내방향으로의 변위를 구속하며, 직선을 유지시켰다. 이러한 이상화는 실제로 많이 사용되어지고 있으며, 다소 보수적이지만 충분히 합리적인 결과를 준다고 알려져 있다. 비선형 좌굴해석기법으로서는 Arc-length method를 적용하여 최종강도 이후의 거동을 파악하는 데 있어서 정확성을 기하였다.

2.2 유공판의 최종강도

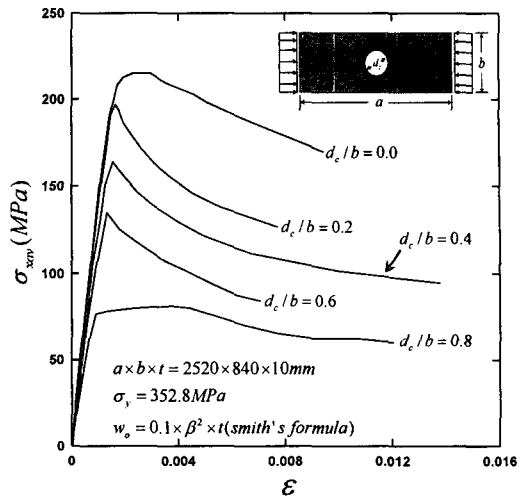
최종한계상태설계의 구조설계 기준은 소성붕괴 내지는 최종강도를 기준으로 하고 있다. 과거 선박들의 구조설계는 최종강도에 대한 고려 없이 단지 부재들의 탄성좌굴강도나 이를 소성 수정한 임계좌굴강도 계산 값들만을 기준으로 설계하였으며, 부재들의 좌굴 후 거동에 대해서는 고려하지 않은 안전율을 반영한 설계가 대부분이었다. 하지만, 이러한 설계는 경량적인 안전율을 결정하기 힘들며, 단지 경험에 의해서 결정되는 경우가 많다. 그렇기 때문에 최종강도에 대한 계산은 반드시 필요하며, 최근에는 육상에서 쓰이는 강구조물이나 해상구조물 뿐만 아니라 선박등의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

2.3 종방향 압축하중이 작용하는 유공판의 최종강도 해석 및 설계식도출

종횡비, cutout의 크기, 세장비를 변화 시켜가며 범용유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 종방향 압축하중이 작용하는 유공판에 대한 최종강도 설계식을 도출하였다. cutout의 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.

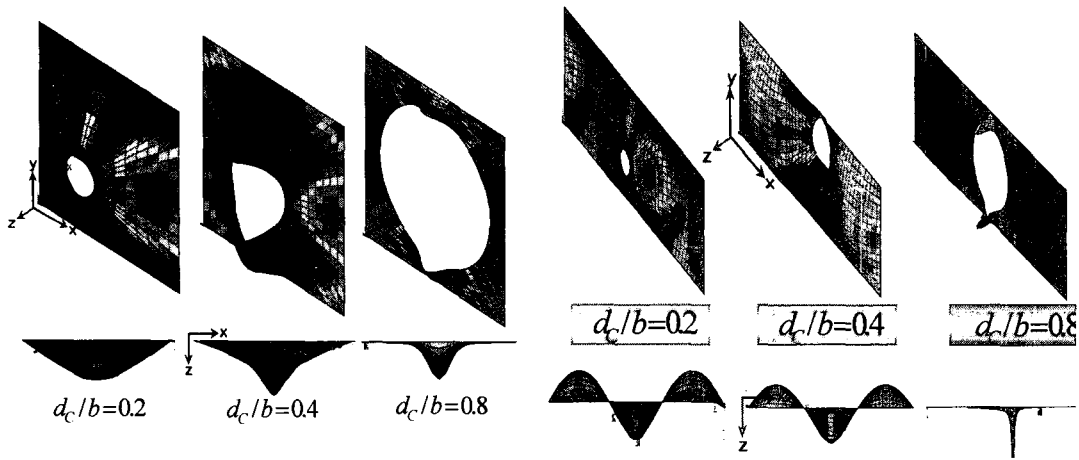


(a) $a/b=1.0$



(b) $a/b=3.0$

Fig.2 A comparison stress with strain curves varying the size of cutouts each aspect ratio 1.0 and 3.0



(a) $a/b=1.0$

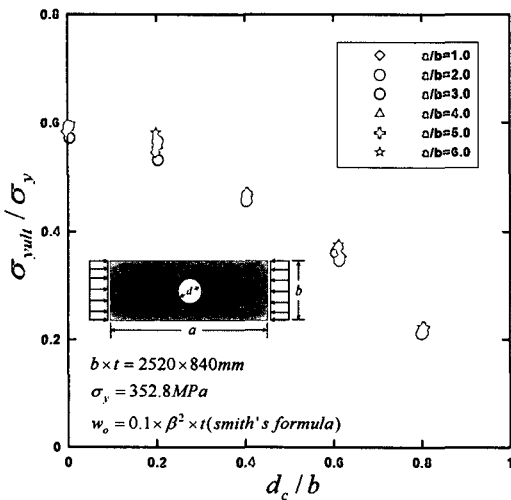
(b) $a/b=3.0$

Fig.3 Deformed shape of a plate varying the size of cutouts each aspect ratio 1.0 and 3.0

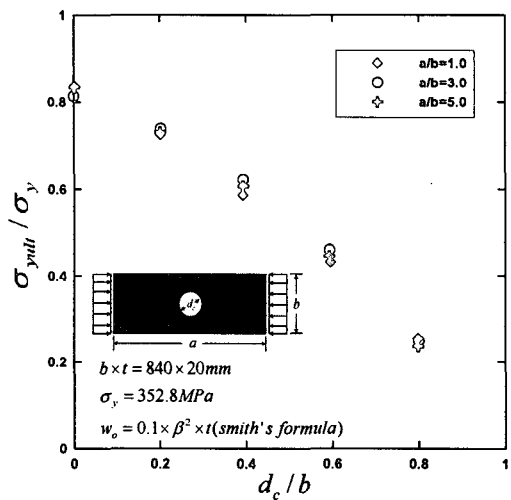
판종횡비(a/b)가 1.0인 유공판에서 유공비를 달리한 탄소성 해석결과를 Fig.2-(a)에 나타내고 있다. 유공이 존재하지 않는 무공인 판을 기준으로 보았을 때 유공비가 커지면 커질수록 최종강도가 감소하며 또한 초기좌굴 이후 면내강성 감소도 커짐을 알 수가 있다. 본 해석에서는 종횡비와 세장비의 영향을 고려하기 위해서 두께를 증가시켜가면서 시리즈해석을 수행하였다. 두께를 10mm로 고정시킨 후 종횡비를 1.0~6.0까지 시리즈해석을 수행하면 무공판을 기준으로 하였을 경우 유공비가 커짐에 따라 최종강도

가 감소하는 거동을 확인할 수가 있다.

특히 종횡비가 3.0에서는 유공비가 0.2일 경우 무공판에 비해서 최종강도 이후 면내강성 감소 차이가 크다는 것을 알 수가 있다. 종횡비 1.0에서의 최종강도 상태에서의 처짐모드는 1모드를 유지하며 종횡비 2.0에서는 유공비가 0.4일 경우에만 3모드를 유지하고 나머지 유공비 에서는 2모드를 유지한다. 종횡비 3.0, 4.0, 5.0, 6.0에서는 각 종횡비의 고유모드를 유지하게 되며 유공비가 0.8에서는 판내 횡변형이 발생 하기 전에 항복이 시작하여 결국은 유공주위의 최소단면이 전단면 항복하여 최종강도에 이르는 거동을 나타내고 있다. Fig.3에서는 종횡비 1.0과 3.0에서의 각 유공비에 따른 최종강도에서의 처짐모드를 나타 내주고 있으며 유공비가 증가할수록 유공주위에서 항복이 발생하여 대각선 방향으로 진행되고 있으며 유공비가 0.6이상에서는 유공주위의 최소단면이 전단면 항복하는 현상을 나타내고 있다. 종횡비와 세 장비의 영향을 고려하기 위해서 두께 15mm에 대해서는 종횡비 3.0, 두께 20mm에서는 종횡비 1.0, 3.0, 5.0에 대해서 각각 계산을 수행하였다. Fig.4-(b)에서는 두께를 20mm로 변화하고 종횡비 1.0과 5.0에서의 탄소성거동을 나타내고 있다. 두께가 두꺼워짐에 따라 초기좌굴 발생 시점이 늦어 져서 결국 판내 좌굴화 소성의 미비한 전개로 인하여 최종강도가 상대적으로 높게 평가되고 있는 공통점을 나타내고 있다. 종횡비가 1.0에서 5.0으로 갈수록 유공비가 커지면 커질수록 최종강도 이 후 면내강성 감소율이 더 급격하게 증가함을 알 수가 있다. 종횡비가 커질수록 유공주위에서 발생 되는 소성화로 인하여 이와 같은 공통적인 현상이 나타나게 된다. 이 그래프에서 확인되듯이 종방 향 압축력을 받는 유공판의 경우는 종횡비의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 실제 무공판의 경우 에도 종방향 압축력을 받는 경우 종횡비가 최종강도에 미치는 영향은 극히 작은 것으로 알려져 있다.



(a) Slenderness ratio=3.48



(a) Slenderness ratio=1.74

Fig.4 Ultimate strengths of plates with cutout under axial compression varying the aspect ratio

Fig.5에서는 세장비의 영향을 고려하기 위해 앞서 계산한 값을 각각의 무공판에 대한 유공판의 최종강도비로 나타내었다. 종횡비 3.0에 대해서 두께를 10mm, 15mm, 20mm ($\beta = 3.3, 2.2, 1.7$)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.

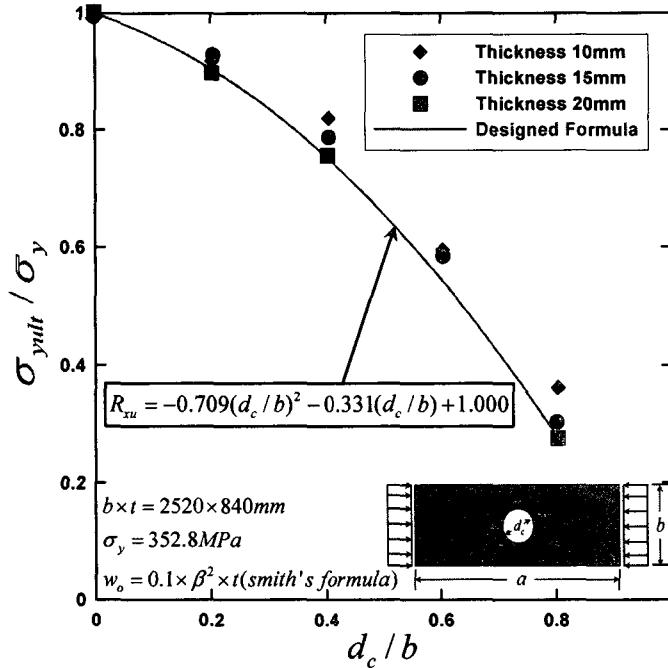


Fig.5 A comparison of the present ultimate strength formulations with FEA under longitudinal axial compression (aspect ratio=3.0)

2.4 횡방향 압축하중이 작용하는 유공판의 최종강도 해석 및 설계식도출

횡방향 압축하중을 받는 유공판에 대한 탄소성대변형 시리즈 해석은 2.3의 종방향 압축력이 작용하는 조건과 같은 조건을 적용하였다. 횡방향 압축하중이 작용하는 유공판에서는 종횡비가 1.0을 제외하고는 유공비에 따라 최종강도 변화가 거의 없는 형태를 나타내게 된다. 그러나, 종횡비 1.0에서는 유공이 존재하면서 최종강도는 점점 감소하는 경향을 보이고 있으며 이는 d_c/a 의 비율이 적어지면서 발생하는 현상으로 판단된다. 실제 선체 이중저 내판에서 사용되는 유공판의 종횡비는 1.0은 거의 찾아볼 수가 없으며 2.0이상임을 감안한다면 경향상의 문제라고 사료된다. Fig.6에서는 종횡비 2.0인 유공판에서의 횡방향 압축하중이 작용할 때 유공비에 따른 최종강도 거동을 나타내고 있다. 유공비가 증가함에 따라 최종강도 감소는 아주 미비하게 나타나고 있으며 이에 따라 처짐모드 형상 또한 동일한 1모드 형태를 유지하게 된다. Fig.7에서는 횡방향 압축하중이 작용하는 유공판에서 종횡비의 영향을 확인하기 위하여 유공비와 최종강도를 항복응력으로 무차원하여 두가지의 세장비와 각 종횡비에 따라서 나타내고 있다.

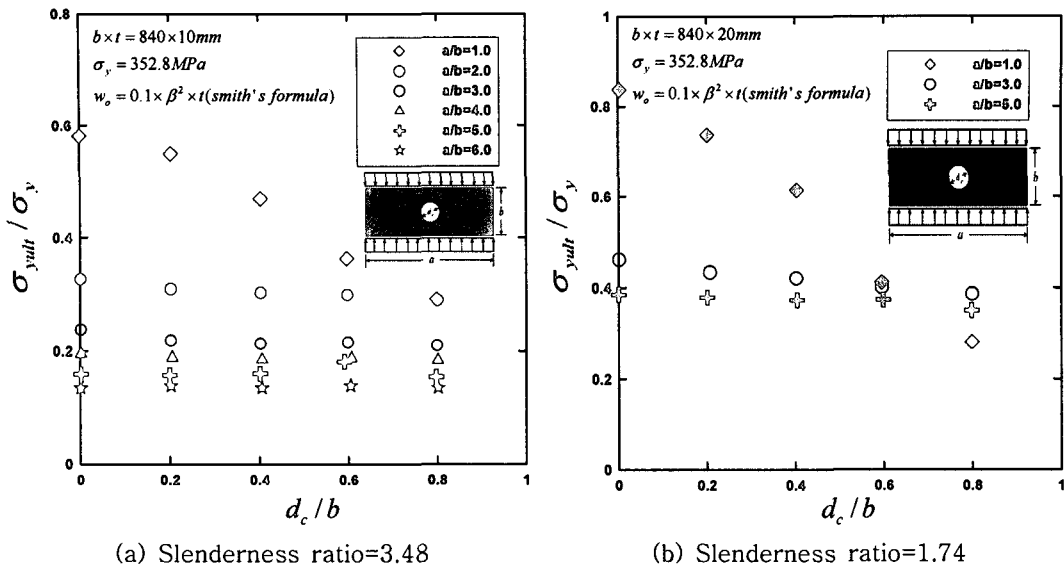


Fig.7 Ultimate strength of plates with cutout under transverse axial compression varying the aspect ratios

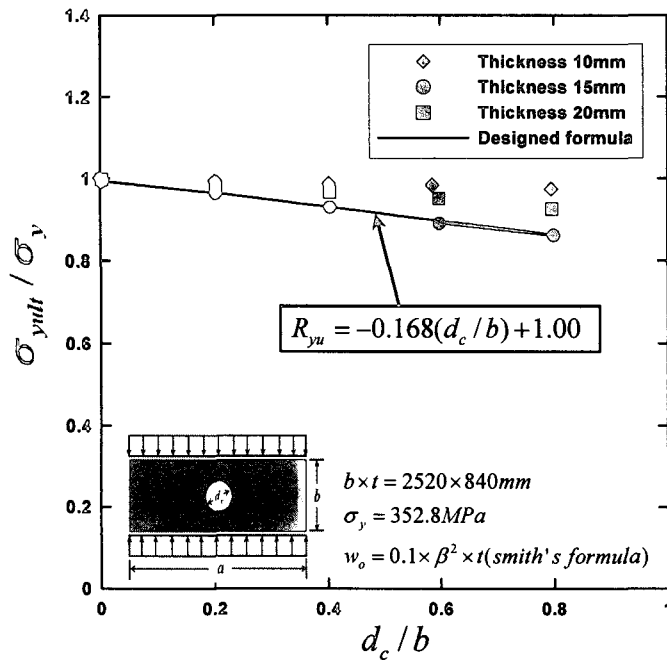


Fig.8 Ultimate strength of plates with cutout under transverse axial compression varying the aspect ratios (slenderness ratio=1.74)

Fig.7-(b)에서는 두께를 20mm로 고정시키고 종횡비 1.0, 3.0, 5.0에 대해서 나타내고 있다. 종횡비 1.0을 제외하면 세장비의 영향은 거의 나타나지 않음을 알 수가 있다.

Fig.8에서는 세장비의 영향을 고려하기 위하여 판두께를 10-20mm 에 대해서 유공비와 최종강도를 항복응력으로 무차원하여 나타내고 있다. 종방향압축이 작용하는 유공판에서와 마찬가지로 횡방향 압축하중이 작용할 경우에도 세장비의 영향은 최종강도 거동에 있어서 영향이 크지 않음을 알 수가 있다. 실제로 유공판에서의 유공비는 0.8인 경우도 거의 드물게 나타나고 있으며 이를 고려할 경우에 유공판에서는 세장비에 대한 고려는 그다지 크지 않다.

4. 결 론

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) 종, 횡방향 압축하중만을 고려할 경우 종횡비 함수는 최종강도에 미치는 영향은 작다.
- (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.

후기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [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 Perforated Rectangular Plate under Thrust, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171, 2001, pp.731-737.